



THE "CLINOPYROXENE" PALEOGEOTHERM BENEATH THE OBNAZHENNAYA KIMBERLITE PIPE AND THICKNESS OF LITHOSPHERE UNDER THE KUOYKA FIELD (SIBERIAN CRATON, YAKUTIA)

E.A. Muraveva¹, A.M. Dymshits ^{2✉}, I.S. Sharygin ^{1,2}, A.V. Golovin ¹, A.M. Logvinova ¹, O.B. Oleinikov³

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

³ Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenin Ave, Yakutsk 677000, Russia

ABSTRACT. The mantle paleogeotherm under the Obnazhennaya kimberlite pipe (Kuoika field, Siberian craton) was reconstructed using the chemical composition of clinopyroxene xenocrystals and the FITPLOT program. The lithosphere thickness 187–193 km and surface heat flow 41–42 mW/m² were measured for the Obnazhennaya pipe at the time of kimberlite magmatism in the Mesozoic. The lithosphere thickness was found to be much smaller than that in the central part of the Siberian craton (210–230 km), where Paleozoic diamond-bearing kimberlite pipes-deposits are located. It is however comparable to the highly diamond-bearing Kimberley field in the Kaapvaal craton (South Africa). The absence of diamonds in the pipes of the Kuoika field, but poor diamondiferous Dyanga pipe, might be associated with the more intense metasomatic alteration of the rocks within the lithospheric mantle of this region in the Mesozoic time, as compared to the central part of the Siberian craton in the Middle Paleozoic time.

KEYWORDS: paleogeotherm; FITPLOT; xenocryst; clinopyroxene; kimberlite; Siberian craton

FUNDING: The study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant 18-77-10062, <https://rscf.ru/project/18-77-10062/>). Field work was supported by the RF state assignment project for IGM SB RAS and DPMGI SB RAS. This work involved the equipment of the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of the IEC SB RAS (grant 075-15-2021-682) for sample preparation and the Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS for electron microprobe analysis.

RESEARCH ARTICLE

Received: August 7, 2022

Revised: August 29, 2022

Correspondence: Anna M. Dymshits, adymshits@crust.irk.ru

Accepted: September 12, 2022

FOR CITATION: Muraveva E.A., Dymshits A.M., Sharygin I.S., Golovin A.V., Logvinova A.M., Oleinikov O.B., 2022. The "Clinopyroxene" Paleogeotherm beneath the Obnazhennaya Kimberlite Pipe and Thickness of Lithosphere under the Kuoika Field (Siberian Craton, Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0664. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0664

«КЛИНОПИРОКСЕНОВАЯ» ПАЛЕОГЕОТЕРМА ПОД КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКОЙ ОБНАЖЕННОЙ: МОЩНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ ПОД КУОЙКСКИМ ПОЛЕМ (СИБИРСКИЙ КРАТОН, ЯКУТИЯ)

Е.А. Муравьева¹, А.М. Дымшиц², И.С. Шарыгин^{1,2}, А.В. Головин¹, А.М. Логвинова¹, О.Б. Олейников³

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

³ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр-т Ленина, 39, Россия

АННОТАЦИЯ. На основе химического состава ксенокристаллов клинопироксена и с использованием программного пакета FITPLOT была реконструирована мантийная палеогеотерма под кимберлитовой трубкой Обнаженной (Куойкское поле, Сибирский кратон). Значения мощности литосферы и поверхностного теплового потока для трубки Обнаженной на момент кимберлитового магматизма (мезозой) составили 187–193 км и 41–42 мВт/м². Полученное значение мощности литосферы значительно меньше, чем в центральной части Сибирского кратона, где располагаются алмазоносные кимберлитовые трубки-месторождения среднепалеозойского возраста (210–230 км), однако оно сопоставимо с таковым в районе высокоалмазоносного поля Кимберли (Каапваальский кратон, Южная Африка). Отсутствие алмазов в трубках Куойкского поля, за исключением убогоалмазоносной трубки Дьянга, может быть связано с интенсивным метасоматическим преобразованием пород литосферной мантии данного региона в мезозое по сравнению с центральной частью Сибирского кратона в среднем палеозое.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: палеогеотерма; FITPLOT; ксенокристалл; клинопироксен; кимберлит; Сибирский кратон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10062 (<https://rscf.ru/project/18-77-10062/>). Экспедиционные работы на кимберлитовой трубке Обнаженной выполнялись в рамках государственного задания ИГМ СО РАН и ИГАБМ СО РАН. В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682 (пробоподготовка) и ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований» ИГМ СО РАН (электронно-зондовый микроанализ).

1. ВВЕДЕНИЕ

Сибирский кратон, сформировавшийся в результате объединения архейских террейнов (микроконтинентов) на рубеже 1.8–1.9 млрд лет назад, является крупной тектонической структурой Азии [Donskaya, 2020]. Сравнительный анализ данных по изучению состава, строения и термального состояния литосферной мантии под отдельными участками кратона, зафиксированных в мантийных ксенолитах из разновозрастных кимберлитов, позволяет объективнее оценить влияние тектонотермальных и сопряженных с ними метасоматических событий на алмазоносный потенциал субкратонной литосферной мантии (СКЛМ). При этом первоочередной задачей является максимально точная реконструкция термального режима СКЛМ.

Термальная СКЛМ центральной части Сибирского кратона на момент среднепалеозойского этапа кимберлитового магматизма достоверно реконструирована для Далдынского и Верхнемунского полей (например [Dymshits et al., 2020; Ziberna et al., 2016]). Краевые части Сибирского кратона, где проявлен более поздний мезозойский этап кимберлитового магматизма, остаются слабоизученными. По мезозойскому Куойкскому кимберлитовому полю имеются несколько противоречащих работ, посвященных теме реконструкции мантийной палеогеотермы [Tychkov et al., 2018; Ashchepkov

et al., 2019; Griffin et al., 1999; Howarth et al., 2014; Ionov et al., 2018].

В работе [Howarth et al., 2014] реконструкция палеогеотермы производилась на основе ксенолитов перидотитов из трубки Обнаженной с помощью широко используемой в настоящее время программы FITPLOT [Mather et al., 2011] со значениями мощности 22 и 23 км и теплогенерации – 1.12 и 0.40 мкВт/м³ верхней и нижней коры. Полученная мощность литосферы соответствовала ~150 км (рис. 1, а). Н.С. Тычков и др. [Tychkov et al., 2018] реконструировали палеогеотерму тем же методом на основе состава ксенокристаллов мантийных клинопироксенов для трубок Второгодница и Дьянга (мощность и теплогенерация верхней и нижней коры: 28, 13 км и 0.76, 0.36 мкВт/м³ соответственно). Мощность литосферы была оценена в ~200 км (рис. 1, а). При мощности СКЛМ в 150 км в ней практически отсутствует область стабильности алмаза, и кимберлитовая магма, таким образом, выносит на поверхность неалмазоносные мантийные породы, что противоречит наличию убогоалмазоносной кимберлитовой трубки Дьянга.

В данной работе для уточнения термального режима и мощности СКЛМ в районе Куойкского поля была реконструирована мантийная палеогеотерма по Р-Т-оценкам ксенокристаллов мантийного клинопироксена

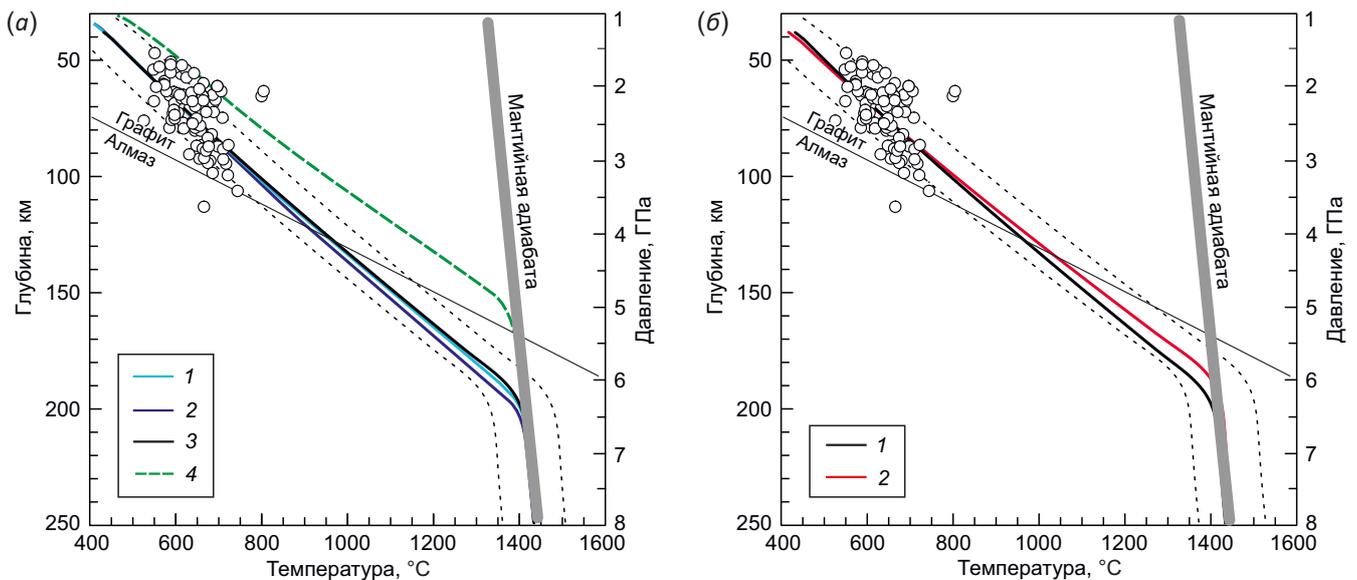


Рис. 1. Реконструированные геотермы (модель 1 и 2, пояснение в тексте) под трубкой Обнаженной в сравнении с литературными данными. (а): 1 – тр. Второгодница [Tychkov et al., 2018]; 2 – тр. Дьянга [Tychkov et al., 2018]; 3 – тр. Обнаженная (модель 1); 4 – тр. Обнаженная [Howarth et al., 2014]. (б): 1 – тр. Обнаженная (модель 1); 2 – тр. Обнаженная (модель 2). Круги – P-T-параметры клинопироксенов из тр. Обнаженной; черные пунктирные линии – погрешность реконструкции геотерм для тр. Обнаженной ((а) – для модели 1; (б) – для модели 2). Интервал мантйной адиабаты 1300–1315 °C.

Fig. 1. Constrains of the mantle paleogeotherms beneath the Obnazhennaya pipe, compared to literature data. (а): 1 – Vtorogodnitsa pipe [Tychkov et al., 2018]; 2 – Dyanga pipe [Tychkov et al., 2018]; 3 – Obnazhennaya pipe (model 1); 4 – Obnazhennaya pipe [Howarth et al., 2014]. (б): 1 – Obnazhennaya pipe (model 1); 2 – Obnazhennaya pipe (model 2). Circles denote P-T parameters of clinopyroxenes from Obnazhennaya pipe; black dotted lines represent the error envelope ((а) – for model 1; (б) – for model 2). Mantle adiabat is 1300–1315 °C.

из трубки Обнаженной с использованием программы FITPLOT.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В пределах Якутской кимберлитовой алмазонасной провинции в районе Лено-Анабарской субпровинции расположено Оленёкское поднятие, где в бассейне р. Оленек находится Куойкское кимберлитовое поле [Rosen et al., 2006]. Трубка Обнаженная представляет собой открытый выход кимберлитовых пород высотой около 30 м на берегу р. Куойка, левого притока р. Оленек. Она сложена в основном кимберлитовой брекчией, содержащей обломки кимберлитов предыдущих фаз внедрения и вмещающих осадочных пород [Kostrovitsky et al., 2015]. Возраст формирования кимберлитов в пределах Куойкского поля оценивается U-Pb методом по цирконам и перовскитам в пределах 128–170 млн лет (см. ссылки в [Sun et al., 2014]) и методом треков по цирконам – 147–165 млн лет [Komarov, Ilupin, 1990].

В данной работе изучены 332 ксенокристалла клинопироксена из трубки Обнаженной, отобранные из тяжелой фракции минералов размерностью 1–2 мм. Содержания главных и примесных элементов в клинопироксенах определялись на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8230 в ИГМ СО РАН. Первая серия анализов выполнена при рутинных параметрах съемки [Lavrent'ev et al., 2015] (Прил. 1) и включала одну точку в центре каждого ксенокристалла клинопироксена. Полученные данные были протестированы

в соответствии со схемой, представленной в работе [Ziberna et al., 2016] для оценки возможности их использования в мономинеральной термобарометрии. На этом этапе был исключен 231 кристалл клинопироксена.

Вторая серия измерений для оставшейся выборки из 101 зерна клинопироксена выполнялась при увеличенном времени набора сигнала для всех элементов (Прил. 1), чтобы повысить точность P-T-оценок [Ziberna et al., 2016]. Кроме того, анализ проводился в трех точках «край – центр – край», что позволило исключить семь зональных зерен. Для оставшихся незональных 92 зерен, удовлетворяющих требованиям для построения палеогеотермы, использовались средние значения для трех анализов (Прил. 2, табл. 2.1), что также повышает точность P-T-оценок [Dymshits et al., 2020].

Для оценки P-T-параметров ксенокристаллов клинопироксена использовался термобарометр из [Nimis, Taylor, 2000]. Численная подгонка линии геотермы к набору P-T-данных (Прил. 2, табл. 2.1) производилась в программе FITPLOT [Mather et al., 2011]. В программу вводятся параметры толщины и теплогенерации земной коры, оцененные для изучаемой области. FITPLOT количественно определяет толщину литосферы как пересечение рассчитанной кондуктивной геотермы с адиабатой конвектирующей мантии, а также позволяет рассчитать значение поверхностного теплового потока. По пересечению линии палеогеотермы с линией графит – алмаз [Day, 2012] и линии перехода

литосфера – астеносфера была оценена мощность так называемого «алмазного окна».

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По содержанию $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ [Nimis, Taylor, 2000] (Прил. 3, рис. 3.1) большинство ксенокристаллов клинопироксена соответствуют кратонным гранатовым (37 %) и шпинелевым (56 %) перидотитам, в поле эклогитов и пироксенитов попадает 7 % от общего числа зерен. Клинопироксены, которые были использованы для построения палеогеотермы, попадают в область гранатовых перидотитов и являются хромистыми диопсидами с вариациями (в %): $\text{Ca}\# = 100 \times \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}) = 45\text{--}49$; $\text{Mg}\# = 100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}) = 91\text{--}96$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.79\text{--}2.26$ мас. % (Прил. 2, табл. 2.1).

Было построено две модели с различным набором входных параметров. Теплогенерация в мантии для обеих моделей принималась равной 0, как рекомендовано в работе [Mather et al., 2011] при моделировании палеогеотерм для СКЛМ. Потенциальная температура мантийной адиабаты на поверхности была принята равной 1300 (модель 1) и 1315 °C (модель 2). В модели 1 была использована мощность верхней и нижней коры 28 и 13 км и ее теплогенерация 0.76 и 0.36 мкВт/м³ в соответствии с работой [Tychkov et al., 2018]. Результирующие значения поверхностного теплового потока и мощности литосферы составили 42 мВт/м² и 193 км (рис. 1, б). В модели 2 были использованы значения мощности 30 и 12 км и теплогенерации верхней и нижней коры 0.76 и 0.36 мкВт/м³, которые предполагаются

наиболее корректными для региона, где располагается Куойкское поле [Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I., 2006]. Значения мощности литосферы и поверхностного теплового потока для трубки Обнаженной в модели 2 следующие: 187 км и 41 мВт/м² (рис. 1, б).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Реконструкция палеогеотермы под трубкой Обнаженной с использованием параметров для коры, аналогичных работе [Tychkov et al., 2018], дает значения мощности литосферы, сопоставимые с трубками Дьянга и Второгодница в пределах погрешности (рис. 1, а). Модель 2 дает значения мощности немного меньше, чем модель 1, однако даже в этом случае можно говорить о сопоставимых результатах, полученных для всех трубок Куойкского поля (рис. 1, б). Таким образом, в мезозое во время проявления кимберлитового магматизма мощность литосферы в этом регионе, вероятно, составляла 187–193 км, что никак не согласуется с оценками, полученными в работе [Howarth et al., 2014] (рис. 1, а). Завышенное положение линии геотермы в районе коры не согласуется с геофизическими данными для этого района [Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I., 2006], а также использование ограниченного набора точек по данным мантийных ксенолитов дает основания предполагать, что реконструкция из работы [Howarth et al., 2014] не совсем корректна.

Большинство клинопироксенов, использованные для термобарометрии, на Р-Т-диаграммах ложатся в ограниченный интервал глубин, 55–105 км (рис. 1) и

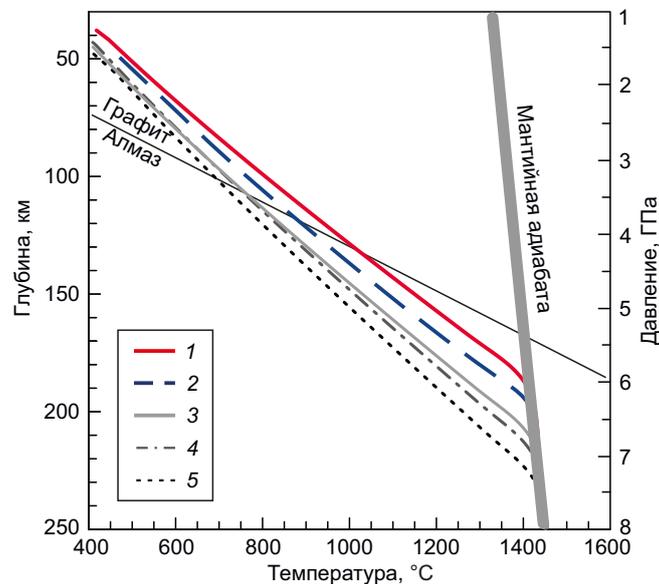


Рис. 2. Мантийная палеогеотерма под трубкой Обнаженной, Куойкское поле (модель 2) в сравнении с палеогеотермами различных регионов, полученных с использованием FITPLOT. 1 – Куойкское поле (тр. Обнаженная, модель 2); 2 – поле Кимберли (тр. Бултфонтейн) [Mather et al., 2011]; 3 – Мирнинское поле (тр. Мир); 4 – Далдынское поле (тр. Удачная); 5 – Верхнемунское поле (тр. Комсомольская-Магнитная) [Dymshits et al., 2020].

Fig. 2. Mantle paleogeotherm beneath the Obnazhennaya pipe, Kuoika field (Model 2) in comparison with the paleogeotherms from different regions obtained with FITPLOT. 1 – Kuoika field (Obnazhennaya pipe, model 2); 2 – Kimberly field (Bultfontein pipe) [Mather et al., 2011]; 3 – Mirny field (Mir pipe); 4 – Daldyn field (Udachnaya pipe); 5 – Upper Muna field (Komsomolskaya-Magnitnaya pipe) [Dymshits et al., 2020].

группируются в верхней части разреза литосферной мантии. Это можно объяснить тем, что кимберлитовая магма трубки Обнаженной при подъеме захватывала мантийный материал в очень ограниченном интервале глубин верхней части литосферной мантии. Однако Р-Т-оценки для перидотитовых гранатов из трубки Обнаженной, полученные на основе составов из работы [Griffin et al., 1999], показывают, что подавляющая часть гранатов вынесена с глубины 105–190 км, что хорошо согласуется с мощностью литосферы, полученной в данной работе. Тем не менее наблюдаемый парадокс в распределении гранатов и клинопироксенов в литосферной мантии под трубкой Обнаженной требует дальнейших исследований.

Согласно данным из работы [Tychkov et al., 2018] и независимо от выбранной модели 1 и 2, термальное состояние мезозойской литосферной мантии под трубкой Обнаженной значительно отличается от центральной части Сибирского кратона. Палеогеотермы, реконструированные для Далдынского, Мирнинского и Верхнемунского кимберлитовых полей, указывают на толщину литосферы в этой области около 210–230 км на момент палеозойского кимберлитового магматизма, что хорошо согласуется с высокой алмазонасностью кимберлитовых трубок этих полей [Ziberna et al., 2016; Tychkov et al., 2018; Dymshits et al., 2020]. Следует отметить, что участок литосферной мантии под Куойкским полем, где возможно существование алмазонасных мантийных пород, так называемое «алмазное окно», имеет мощность ~50 км. Вместе с тем мощность литосферы Куойкского поля сопоставима с таковой в районе кимберлитового поля Кимберли (Каапваальский кратон, Южная Африка), где находятся алмазонасные трубки (рис. 2). Таким образом, возникает вопрос: почему при мощности литосферы, достаточной для существования алмазонасных мантийных пород, кроме убогоалмазонасной трубки Дьянга, все остальные проявления кимберлитов Куойкского поля не содержат алмазы.

Считается, что основными материнскими породами для перидотитовых алмазов в литосферной мантии Сибирского кратона являются дуниты и гарцбургиты (с низко-Са пиропом), гораздо реже – гарцбургиты (с Са пиропом) и гранатовые лерцолиты, очень редко – верлиты [Pokhilenko et al., 1991; Sobolev et al., 1997, 2004; Malkovets et al., 2007]. Поднимаясь к поверхности, кимберлитовая магма может проходить через участки, где таких пород было очень мало, что в целом связано с неоднородностью состава литосферной мантии Сибирского кратона (например, как было показано для Мирнинского поля в [Agashev et al., 2018]). При этом по оценкам химического состава ксенокристаллов граната на глубинах в зоне «алмазного окна» в литосферной мантии Куойкского поля отсутствуют гранаты низко-Са гарцбургитового/дунитового и Са-гарцбургитового парагенезиса [Griffin et al., 1999; Pokhilenko et al., 1999], тогда как в мантии под среднепалеозойскими кимберлитовыми полями они представлены широко.

Таким образом, убогая алмазонасность трубки Дьянга и отсутствие алмазов в других трубках Куойкского поля могут быть связаны с более интенсивным метасоматическим преобразованием пород литосферной мантии данного региона в мезозое по сравнению с центральной частью Сибирского кратона в среднем палеозое. Такое состояние мантии может быть вызвано глубинными расплавами/флюидами, связанными с триасовым трапповым магматизмом [Pokhilenko et al., 1999; Howarth et al., 2014; Tychkov et al., 2018].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция мантийной палеогеотермы под кимберлитовой трубкой Обнаженной была произведена на основе Р-Т-оценок ксенокристаллов клинопироксена в программе FITPLOT. Полученное значение мощности литосферы в пределах погрешности согласуется с реконструкциями для трубок Второгодница и Дьянга, что указывает на то, что в мезозое при проявлении кимберлитового магматизма мощность литосферы в районе Куойкского поля составляла 187–193 км.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- 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, 597–608. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0617-4>.
- Ashchepkov I.V., Ivanov A.S., Kostrovitsky S.I., Vavilov M.A., Babushkina S.A., Vladykin N.V., Tychkov N.S., Medvedev N.S., 2019. Mantle Terranes of the Siberian Craton: Their Interaction with Plume Melts Based on Thermobarometry and Geochemistry of Mantle Xenocrysts. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 197–245 (in Russian) [Ащепков И.В., Иванов А.С., Костровицкий С.И., Вавилов М.А., Бабушкина С.А., Владыкин Н.В., Тычков Н.С., Медведев Н.С. Мантийные террейны Сибирского кратона: их взаимодействие с плюмовыми расплавами на основании термобарометрии и геохимии мантийных ксенокристов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 197–245]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0412>.
- Day H.W., 2012. A Revised Diamond-Graphite Transition Curve. *American Mineralogist* 97 (1), 52–62. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3763>.

- Donskaya T.V., 2020. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids. *Precambrian Research* 348, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869>.
- Dymshits A.M., Sharygin I.S., Malkovets V.G., Yakovlev I.V., Gibsher A.A., Alifirova T.A., Vorobei S.S., Potapov S.V., Garinin V.K., 2020. Thermal State, Thickness, and Composition of the Lithospheric Mantle beneath the Upper Muna Kimberlite Field (Siberian Craton) Constrained by Clinopyroxene Xenocrysts and Comparison with Daldyn and Mirny Fields. *Minerals* 10 (6), 549. <https://doi.org/10.3390/min10060549>.
- 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* 310 (1–4), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).
- Howarth G., Barry P., Pernet-Fisher J., Baziotis I., Pokhilenko N., Pokhilenko L., Bodnar R., Taylor L., Agashev A., 2014. Superplume Metasomatism: Evidence from Siberian Mantle Xenoliths. *Lithos* 184–187, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.006>.
- Ionov D.A., Doucet L.S., Xu Y., Golovin A.V., Oleinikov O.B., 2018. Reworking of Archean Mantle in the Ne Siberian Craton by Carbonatite and Silicate Melt Metasomatism: Evidence from a Carbonate-Bearing, Dunite-To-Websterite Xenolith Suite from the Obnazhennaya Kimberlite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 224, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.028>.
- Komarov A.N., Ilupin I.P., 1990. Geochronology of Kimberlites of the Siberian Platform from the Data Obtained by Tracking Method. *Geochemistry* 3, 365–372 (in Russian) [Комаров А.Н., Илупин И.П. Геохронология кимберлитов Сибирской платформы по данным метода треков // Геохимия. 1990. № 3. С. 365–372].
- Kostrovitsky S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A., Fon-Der-Flaas G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N., 2015. Atlas of Primary Diamond Deposits of Yakutian Kimberlite Province. Printing House of Mirny Town, Mirny, 480 p. (in Russian) [Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А., Фон-Дер-Флаас Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: Мирнинская городская типография, 2015. 480 с.].
- Lavrent'ev Y.G., Karmanov N.S., Usova L.V., 2015. Electron Probe Microanalysis of Minerals: Microanalyzer or Scanning Electron Microscope? *Russian Geology and Geophysics* 56 (8), 1154–1161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.07.006>.
- Malkovets V.G., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Wood B.J., 2007. Diamond, Subcalcic Garnet, and Mantle Metasomatism: Kimberlite Sampling Patterns Define the Link. *Geology* 35 (4), 339–342. <https://doi.org/10.1130/G23092A.1>.
- Mather K.A., Pearson D.G., McKenzie D., Kjarsgaard B.A., Priestley K., 2011. Constraints on the Depth and Thermal History of Cratonic Lithosphere from Peridotite Xenoliths, Xenocrysts and Seismology. *Lithos* 125 (1–2), 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.04.003>.
- Nimis P., Taylor W., 2000. Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part I. Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 139, 541–554. <https://doi.org/10.1007/s004100000156>.
- Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I., 2006. Upper Mantle Structure of the Northern Eurasia from Peaceful Nuclear Explosion Data. *Tectonophysics* 416, 33–52. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.010>.
- Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Boyd F.R., Sobolev N.V., 1991. Megacrystalline Dunites: Source of Siberian Diamonds. *Carnegie Institution of Washington Yearbook* 90. P. 11–18.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N., 1999. Peculiarities of Distribution of Pyroxenite Paragenesis Garnets in Yakutian Kimberlites and Some Aspects of the Evolution of the Siberian Craton Lithospheric Mantle. *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference (April 11–17, 1998, Cape Town, South Africa)*. Vol. 2. Red Roof Design, Cape Town, p. 689–698.
- Rosen O.M., Manakov A.V., Zinchuk N.N., 2006. Siberian Craton: Formation, and Diamond Potential. *Nauchny Mir, Moscow*, 210 p. (in Russian) [Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. М.: Научный мир, 2006. 210 с.].
- Sobolev N.V., Kaminsky F.V., Griffin W.L., Yefimova E.S., Win T.T., Ryan C.G., Botkunov A.I., 1997. Mineral Inclusions in Diamonds from the Sputnik Kimberlite Pipe Yakutia. *Lithos* 39 (3–4), 135–157. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(96\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(96)00022-9).
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Seryotkin Y.V., Yefimova E.S., 2004. Mineral Inclusions in Microdiamonds and Macrodiamonds from Kimberlites of Yakutia: A Comparative Study. *Lithos* 77 (1–4), 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.001>.
- Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F.-Y., Yakovlev D., Yang Y.-H., Yang J.-H., 2014. Repeated Kimberlite Magmatism beneath Yakutia and Its Relationship to Siberian Flood Volcanism: Insights from in Situ U-Pb and Sr-Nd Perovskite Isotope Analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 404, 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>.
- Tychkov N.S., Yudin D.S., Nikolenko E.I., Malygina E.V., Sobolev N.V., 2018. Mesozoic Lithospheric Mantle of the Northeastern Siberian Craton (Evidence from Inclusions in Kimberlite). *Russian Geology and Geophysics* 59 (10), 1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.005>.
- Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V.G., 2016. Error Sources in Single-Clinopyroxene Thermobarometry and a Mantle Geotherm for the Novinka Kimberlite, Yakutia. *American Mineralogist* 101 (10), 2222–2232. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5540>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

ПАРАМЕТРЫ СЪЕМКИ КСЕНОКРИСТАЛЛОВ КЛИНОПИРОКСЕНА ИЗ ТРУБКИ ОБНАЖЕННОЙ
НА РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОМ МИКРОАНАЛИЗАТОРЕ JEOL JXA-8230

Содержание главных и примесных элементов в клинопироксенах определялось на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8230 в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Были выполнены две серии анализов с различными наборами параметров съемки. В качестве стандартов использовались: альбит (Na_2O), диопсид (MgO , CaO , SiO_2), пироп Уд-92 (Cr_2O_3), пироп О-145 (Al_2O_3 , FeO), стекло (TiO_2), ортоклаз (K_2O), Mn-гранат (MnO).

Первая серия анализов производилась в одной точке в центре каждого ксенокристалла клинопироксена при силе тока зонда (I), равной 100 нА. Значение ускоряющего напряжения (V) = 20 кВ. Время набора сигнала (t) для всех элементов на пике равнялось 10 с, а на фоне – 5 с. Диаметр пучка электронного зонда 2 мкм.

При этих параметрах пределы обнаружения элементов (3σ) составляли (в мас. %): для CaO и K_2O 0.01, для Na_2O 0.02–0.03, для MgO 0.03–0.04, для остальных элементов 0.02.

Вторая серия анализов выполнялась в трех точках «край – центр – край» (расположенных вдоль профиля по длинной оси зерна) для клинопироксенов, прошедших через все фильтры [Ziberna et al., 2016] со значениями I и V аналогичными первой серии анализов. Значения t для Na и K составляли 30 с на пике и 15 с – фон, для остальных элементов оно равно 60 сек на пике и 30 с – фон. Диаметр пучка электронного зонда 2 мкм. При этих параметрах пределы обнаружения элементов (3σ) составляли (в мас. %): для Na_2O 0.02, для MgO 0.04, для остальных элементов 0.01.

Таблица 2.1. Химический состав и P-T-оценки для клинопироксенов из трубки Обнаженной (среднее для трех анализов)
Table 2.1. Chemical composition and P-T values for clinopyroxene xenocrystals from Obnazhennaya pipe (average for three analyses)

№ п/п	Мас. %											Формульные единицы, рассчитанные на 6 атомов кислорода													P, ГПа	T, °C
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	∑ катионов	Ca#	Mg#		
1	53.60	0.34	3.60	1.51	1.42	0.05	15.54	21.58	1.95	-	99.60	1.946	0.009	0.154	0.043	0.043	0.001	0.841	0.839	0.137	-	4.015	0.49	0.95	1.8	547.8
2	54.17	0.35	3.85	1.44	1.40	0.05	15.58	21.54	2.00	-	100.38	1.948	0.009	0.163	0.041	0.042	0.002	0.835	0.830	0.139	-	4.010	0.49	0.95	1.8	612.1
3	54.32	0.08	1.89	1.04	1.59	0.06	16.77	22.84	1.34	-	99.93	1.969	0.002	0.081	0.030	0.048	0.002	0.906	0.887	0.094	-	4.020	0.48	0.95	2.5	525.5
4	54.44	0.15	3.23	1.29	1.39	0.07	16.12	22.26	1.48	-	100.43	1.957	0.004	0.137	0.037	0.042	0.002	0.864	0.858	0.104	-	4.004	0.49	0.95	2.1	689.0
5	54.33	0.05	2.64	1.07	1.98	0.06	16.01	21.39	2.01	-	99.54	1.974	0.001	0.113	0.031	0.060	0.002	0.867	0.833	0.141	-	4.023	0.47	0.94	2.6	585.1
6	54.04	0.15	2.77	1.03	1.34	0.07	16.62	22.73	1.22	-	99.95	1.954	0.004	0.118	0.029	0.040	0.002	0.896	0.881	0.085	-	4.011	0.48	0.96	2.0	656.0
7	54.29	0.15	3.51	0.90	1.47	0.06	15.90	22.00	1.81	-	100.08	1.958	0.004	0.149	0.026	0.044	0.002	0.855	0.850	0.127	-	4.014	0.49	0.95	1.5	550.8
8	54.47	0.32	3.65	1.42	1.52	0.06	15.52	20.72	2.48	-	100.16	1.961	0.009	0.155	0.041	0.046	0.002	0.833	0.799	0.173	-	4.019	0.48	0.95	2.1	585.8
9	53.65	0.21	3.60	1.23	1.37	0.06	15.98	21.97	1.65	-	99.73	1.944	0.006	0.154	0.035	0.041	0.002	0.863	0.853	0.116	-	4.014	0.49	0.95	1.8	622.9
10	54.77	0.25	3.16	1.60	1.69	0.06	15.59	21.01	2.26	-	100.37	1.970	0.007	0.134	0.046	0.051	0.002	0.836	0.810	0.157	-	4.012	0.48	0.94	2.5	637.4
11	54.04	0.36	3.86	1.51	1.48	0.05	15.48	21.45	2.00	-	100.24	1.947	0.010	0.164	0.043	0.044	0.002	0.831	0.828	0.139	-	4.009	0.49	0.95	1.9	624.7
12	54.89	0.06	1.74	0.82	1.44	0.06	17.07	23.07	1.10	-	100.25	1.979	0.002	0.074	0.023	0.043	0.002	0.917	0.891	0.077	-	4.009	0.48	0.95	2.8	661.0
13	55.09	0.08	1.63	0.82	1.55	0.06	16.99	23.05	1.14	-	100.42	1.984	0.002	0.069	0.023	0.047	0.002	0.912	0.889	0.080	-	4.008	0.48	0.95	3.0	654.9
14	54.90	0.14	2.76	1.17	1.45	0.05	16.20	22.03	1.78	-	100.47	1.972	0.004	0.117	0.033	0.043	0.002	0.867	0.848	0.124	-	4.011	0.48	0.95	2.3	605.6
15	54.76	0.06	3.08	1.32	1.37	0.07	16.03	22.12	1.71	-	100.52	1.966	0.002	0.130	0.038	0.041	0.002	0.858	0.851	0.119	-	4.008	0.49	0.95	2.1	617.4
16	54.91	0.05	3.44	2.26	2.43	0.08	15.01	19.08	3.11	-	100.38	1.978	0.001	0.146	0.064	0.073	0.002	0.806	0.736	0.217	-	4.024	0.46	0.92	3.2	721.1
17	54.75	0.19	2.36	1.56	1.66	0.06	16.26	21.49	1.82	0.01	100.16	1.975	0.005	0.100	0.045	0.050	0.002	0.875	0.831	0.128	-	4.011	0.47	0.95	3.1	716.9
18	53.95	0.26	2.82	1.38	1.35	0.05	16.00	21.81	1.72	-	99.34	1.962	0.007	0.121	0.040	0.041	0.002	0.867	0.850	0.122	-	4.011	0.48	0.95	2.2	607.3
19	54.68	0.10	3.04	1.20	1.31	0.07	16.30	22.49	1.48	-	100.66	1.961	0.003	0.128	0.034	0.039	0.002	0.871	0.864	0.103	-	4.006	0.49	0.96	2.1	648.3
20	54.86	0.06	2.99	1.14	1.34	0.06	16.22	22.23	1.63	-	100.53	1.969	0.001	0.126	0.032	0.040	0.002	0.867	0.855	0.114	-	4.007	0.49	0.96	2.1	636.1
21	54.33	0.26	3.57	1.47	1.61	0.06	15.78	21.16	2.05	0.01	100.30	1.956	0.007	0.151	0.042	0.048	0.002	0.847	0.816	0.143	-	4.012	0.48	0.95	2.2	686.7
22	54.83	0.23	2.75	1.58	1.66	0.06	16.19	21.33	2.01	-	100.63	1.969	0.006	0.116	0.045	0.050	0.002	0.867	0.820	0.140	-	4.014	0.47	0.95	2.8	696.6
23	54.43	0.14	3.31	1.15	1.34	0.07	16.14	22.33	1.50	-	100.40	1.957	0.004	0.140	0.033	0.040	0.002	0.865	0.860	0.104	-	4.005	0.49	0.96	1.9	664.1
24	54.28	0.10	3.27	1.38	1.43	0.06	16.18	21.96	1.62	-	100.29	1.955	0.003	0.139	0.039	0.043	0.002	0.869	0.847	0.113	-	4.010	0.48	0.95	2.2	692.1
25	54.78	0.14	2.67	0.99	1.28	0.06	16.46	22.68	1.45	-	100.51	1.968	0.004	0.113	0.028	0.038	0.002	0.882	0.873	0.101	-	4.008	0.49	0.96	2.1	595.2
26	53.43	0.04	3.49	1.41	1.63	0.08	16.35	22.40	1.04	-	99.89	1.936	0.001	0.149	0.040	0.049	0.003	0.883	0.870	0.073	-	4.005	0.48	0.95	2.1	799.6
27	54.75	0.26	3.32	2.04	1.88	0.06	15.28	19.96	2.79	-	100.35	1.971	0.007	0.141	0.058	0.057	0.002	0.820	0.770	0.195	-	4.020	0.47	0.94	2.8	648.1
28	54.93	0.05	2.37	1.63	1.75	0.06	16.10	21.49	1.92	-	100.31	1.980	0.001	0.101	0.047	0.053	0.002	0.865	0.830	0.134	-	4.012	0.47	0.94	3.0	680.0
29	55.05	0.11	3.86	1.93	2.62	0.09	14.84	18.38	3.44	-	100.31	1.980	0.003	0.164	0.055	0.079	0.003	0.796	0.709	0.240	-	4.027	0.45	0.91	3.4	743.8
30	55.00	0.05	2.31	1.66	1.74	0.06	16.12	21.55	1.90	-	100.39	1.981	0.001	0.098	0.047	0.052	0.002	0.865	0.832	0.133	-	4.012	0.48	0.94	3.0	674.5

Таблица 2.1 (продолжение)

Table 2.1 (continued)

№ п/п	Мас. %											Формульные единицы, рассчитанные на 6 атомов кислорода													P, ГПа	T, °C
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	∑ катионов	Ca#	Mg#		
31	54.30	0.09	3.54	1.85	1.64	0.05	15.50	21.33	2.12	-	100.42	1.955	0.003	0.150	0.053	0.049	0.002	0.832	0.823	0.148	-	4.015	0.48	0.94	2.1	604.4
32	55.04	0.03	2.09	1.50	1.48	0.06	16.48	22.13	1.69	-	100.49	1.980	0.001	0.089	0.043	0.044	0.002	0.883	0.853	0.118	-	4.013	0.48	0.95	2.9	631.2
33	54.82	0.13	2.54	1.21	1.45	0.06	16.29	22.05	1.73	-	100.27	1.974	0.004	0.108	0.034	0.044	0.002	0.875	0.851	0.121	-	4.011	0.48	0.95	2.5	616.7
34	54.33	0.23	3.06	1.60	1.38	0.04	15.87	21.64	1.94	-	100.07	1.961	0.006	0.130	0.046	0.042	0.001	0.854	0.837	0.135	-	4.012	0.48	0.95	2.2	596.5
35	54.13	0.21	3.27	1.35	1.54	0.07	16.14	22.12	1.53	0.01	100.35	1.950	0.006	0.139	0.038	0.046	0.002	0.867	0.854	0.107	-	4.009	0.48	0.95	2.1	685.8
36	54.43	0.32	3.65	1.81	1.41	0.05	15.47	20.93	2.34	-	100.42	1.957	0.009	0.154	0.052	0.042	0.002	0.829	0.806	0.163	-	4.013	0.48	0.95	2.2	613.3
37	54.33	0.28	4.01	2.05	1.49	0.06	15.11	20.25	2.66	0.01	100.24	1.955	0.008	0.170	0.058	0.045	0.002	0.811	0.781	0.186	-	4.016	0.48	0.95	2.2	624.0
38	54.60	0.10	2.90	1.08	1.30	0.07	16.37	22.47	1.42	-	100.30	1.965	0.003	0.123	0.031	0.039	0.002	0.878	0.866	0.099	-	4.005	0.49	0.96	2.1	663.0
39	54.57	0.23	3.31	1.67	1.70	0.06	15.36	20.75	2.42	0.01	100.08	1.969	0.006	0.141	0.048	0.051	0.002	0.826	0.802	0.169	-	4.015	0.48	0.94	2.4	593.1
40	54.57	0.30	3.54	1.46	2.29	0.07	15.08	19.64	2.86	-	99.82	1.974	0.008	0.151	0.042	0.069	0.002	0.813	0.761	0.201	-	4.022	0.46	0.92	2.8	662.6
41	54.62	0.06	2.91	1.25	1.54	0.07	16.37	21.91	1.64	-	100.37	1.965	0.002	0.123	0.036	0.046	0.002	0.878	0.845	0.114	-	4.011	0.48	0.95	2.4	708.5
42	54.33	0.12	3.33	1.28	1.44	0.06	16.18	22.34	1.41	-	100.49	1.953	0.003	0.141	0.036	0.043	0.002	0.867	0.860	0.098	-	4.004	0.49	0.95	2.0	705.6
43	54.97	0.10	2.54	1.22	1.58	0.06	16.13	21.94	1.74	-	100.28	1.979	0.003	0.108	0.035	0.047	0.002	0.866	0.847	0.122	-	4.008	0.48	0.95	2.6	644.6
44	54.55	0.31	3.20	1.51	1.43	0.05	15.86	21.57	1.85	-	100.33	1.962	0.008	0.135	0.043	0.043	0.002	0.851	0.832	0.129	-	4.005	0.48	0.95	2.3	688.1
45	54.40	0.11	2.59	0.90	1.58	0.05	16.53	22.82	1.24	-	100.22	1.963	0.003	0.110	0.026	0.048	0.002	0.889	0.882	0.087	-	4.009	0.49	0.95	2.1	636.4
46	54.64	0.33	3.82	2.12	1.81	0.06	14.84	19.46	3.02	-	100.09	1.969	0.009	0.162	0.060	0.055	0.002	0.797	0.751	0.211	-	4.016	0.47	0.94	2.6	657.4
47	54.97	0.05	2.78	1.13	1.37	0.07	16.22	22.29	1.58	-	100.46	1.974	0.001	0.118	0.032	0.041	0.002	0.868	0.858	0.110	-	4.005	0.49	0.95	2.3	645.1
48	54.43	0.09	2.62	0.92	1.65	0.05	16.55	22.81	1.21	-	100.34	1.962	0.003	0.111	0.026	0.050	0.002	0.889	0.881	0.085	-	4.009	0.48	0.95	2.1	662.4
49	54.91	0.17	2.64	1.42	1.73	0.05	16.05	21.48	1.89	-	100.35	1.976	0.005	0.112	0.041	0.052	0.002	0.861	0.828	0.132	-	4.009	0.48	0.94	2.8	697.7
50	54.85	0.08	3.29	1.85	1.58	0.06	15.32	20.61	2.54	-	100.17	1.976	0.002	0.140	0.053	0.047	0.002	0.823	0.795	0.177	-	4.015	0.48	0.95	2.5	590.1
51	55.07	0.05	2.31	1.62	1.77	0.06	16.11	21.69	1.86	-	100.54	1.981	0.001	0.098	0.046	0.053	0.002	0.864	0.836	0.130	-	4.011	0.48	0.94	3.0	665.7
52	55.13	0.06	2.50	1.63	1.71	0.06	15.96	21.55	1.94	-	100.53	1.981	0.002	0.106	0.046	0.051	0.002	0.855	0.830	0.135	-	4.008	0.48	0.94	2.9	670.3
53	54.07	0.23	3.67	1.46	1.45	0.06	15.78	21.94	1.60	0.01	100.27	1.948	0.006	0.156	0.042	0.044	0.002	0.848	0.847	0.111	0.001	4.003	0.49	0.95	2.0	696.7
54	54.86	0.09	2.24	0.96	1.53	0.06	16.57	22.62	1.45	-	100.39	1.975	0.002	0.095	0.027	0.046	0.002	0.890	0.873	0.101	-	4.012	0.48	0.95	2.4	597.4
55	54.72	0.05	2.70	1.14	1.52	0.06	15.99	22.00	1.81	-	99.99	1.976	0.001	0.115	0.033	0.046	0.002	0.861	0.852	0.127	-	4.012	0.48	0.95	2.2	549.0
56	54.83	0.08	3.34	1.81	1.54	0.06	15.39	20.66	2.42	0.01	100.14	1.975	0.002	0.142	0.052	0.046	0.002	0.826	0.797	0.169	0.001	4.011	0.48	0.95	2.5	639.1
57	54.65	0.19	3.38	1.65	1.87	0.07	15.97	20.47	2.49	0.01	100.75	1.960	0.005	0.143	0.047	0.056	0.002	0.854	0.787	0.173	0.001	4.027	0.46	0.94	2.7	683.5
58	53.60	0.03	3.53	1.31	1.59	0.08	16.43	22.65	0.94	-	100.17	1.936	0.001	0.150	0.038	0.048	0.002	0.885	0.876	0.066	-	4.002	0.48	0.95	2.1	804.3
59	55.17	0.29	3.26	1.59	1.68	0.06	15.81	21.27	2.31	-	101.43	1.965	0.008	0.137	0.045	0.050	0.002	0.839	0.812	0.159	-	4.016	0.48	0.94	2.3	605.4
60	53.95	0.39	3.39	1.64	1.38	0.04	15.36	21.24	2.09	-	99.49	1.958	0.011	0.145	0.047	0.042	0.001	0.831	0.826	0.147	-	4.009	0.49	0.95	2.1	578.0
61	55.09	0.16	2.68	1.17	1.54	0.05	16.08	21.79	1.85	-	100.42	1.979	0.004	0.114	0.033	0.046	0.002	0.861	0.839	0.129	-	4.007	0.48	0.95	2.6	645.2
62	53.81	0.35	4.04	1.45	1.45	0.05	15.60	21.38	2.07	-	100.21	1.940	0.009	0.172	0.041	0.044	0.002	0.838	0.826	0.145	-	4.017	0.48	0.95	1.7	598.6

Таблица 2.1 (продолжение)
Table 2.1 (continued)

№ п/п	Мас. %											Формульные единицы, рассчитанные на 6 атомов кислорода													Р, ГПа	Т, °С
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	∑ катионов	Ca#	Mg#		
63	54.56	0.29	3.52	1.25	1.49	0.05	15.69	21.42	2.15	-	100.42	1.960	0.008	0.149	0.035	0.045	0.002	0.841	0.825	0.149	-	4.014	0.48	0.95	1.9	573.3
64	54.73	0.34	3.73	1.65	1.28	0.04	15.48	20.95	2.38	-	100.57	1.961	0.009	0.157	0.047	0.038	0.001	0.827	0.804	0.165	-	4.010	0.48	0.96	2.1	609.1
65	54.49	0.33	3.79	2.01	1.83	0.05	15.26	19.53	3.08	-	100.38	1.960	0.009	0.161	0.057	0.055	0.002	0.818	0.753	0.215	-	4.029	0.46	0.94	2.6	618.2
66	54.69	0.17	3.29	0.98	1.48	0.06	16.03	22.14	1.75	-	100.59	1.963	0.005	0.139	0.028	0.044	0.002	0.857	0.851	0.122	-	4.011	0.49	0.95	1.8	587.9
67	54.95	0.25	3.24	1.83	1.59	0.05	15.32	20.86	2.33	-	100.42	1.974	0.007	0.137	0.052	0.048	0.002	0.820	0.803	0.162	-	4.006	0.48	0.94	2.5	646.7
68	54.76	0.33	4.11	1.30	1.48	0.06	15.28	20.97	2.46	-	100.76	1.958	0.009	0.173	0.037	0.044	0.002	0.815	0.804	0.171	-	4.013	0.48	0.95	1.7	561.5
69	55.52	0.08	2.76	1.49	2.19	0.08	15.62	20.43	2.60	-	100.78	1.990	0.002	0.117	0.042	0.066	0.002	0.834	0.785	0.181	-	4.019	0.47	0.93	3.7	665.4
70	55.16	0.23	2.69	1.51	1.62	0.05	16.30	21.50	1.95	0.01	101.02	1.972	0.006	0.113	0.043	0.048	0.002	0.869	0.823	0.135	-	4.012	0.47	0.95	2.9	710.1
71	54.31	0.13	2.82	0.99	1.58	0.06	16.68	22.79	1.27	-	100.62	1.953	0.003	0.120	0.028	0.047	0.002	0.894	0.878	0.088	-	4.014	0.48	0.95	2.0	654.5
72	54.60	0.14	3.69	1.13	1.48	0.07	15.86	21.94	1.78	-	100.69	1.956	0.004	0.156	0.032	0.044	0.002	0.847	0.842	0.124	-	4.008	0.49	0.95	1.8	642.3
73	54.18	0.18	3.40	1.01	1.40	0.05	16.32	22.47	1.55	-	100.57	1.947	0.005	0.144	0.029	0.042	0.001	0.875	0.865	0.108	-	4.016	0.49	0.95	1.6	588.5
74	55.10	0.09	2.82	1.10	1.33	0.07	16.63	22.73	1.41	-	101.25	1.965	0.002	0.118	0.031	0.040	0.002	0.884	0.868	0.097	-	4.007	0.48	0.96	2.2	664.0
75	55.07	0.22	2.95	1.47	1.73	0.06	15.93	21.51	2.02	0.01	100.97	1.970	0.006	0.124	0.041	0.052	0.002	0.850	0.825	0.140	-	4.011	0.48	0.94	2.5	656.5
76	54.52	0.27	3.43	1.46	1.63	0.06	16.03	21.07	2.19	-	100.67	1.956	0.007	0.145	0.041	0.049	0.002	0.857	0.810	0.152	-	4.020	0.47	0.95	2.3	670.6
77	55.27	0.05	1.93	0.87	1.28	0.06	16.94	23.56	0.95	-	100.90	1.979	0.001	0.082	0.025	0.038	0.002	0.904	0.904	0.066	-	4.000	0.49	0.96	2.4	647.9
78	55.31	0.23	2.83	1.50	1.70	0.06	15.87	21.36	1.98	-	100.83	1.979	0.006	0.119	0.042	0.051	0.002	0.847	0.819	0.137	-	4.002	0.48	0.94	2.8	722.4
79	55.06	0.06	3.05	1.35	1.38	0.06	15.98	22.12	1.73	-	100.79	1.971	0.002	0.129	0.038	0.041	0.002	0.853	0.848	0.120	-	4.004	0.49	0.95	2.2	638.7
80	54.90	0.29	3.74	1.49	2.25	0.06	15.07	20.00	2.81	-	100.23	1.971	0.008	0.158	0.042	0.068	0.002	0.806	0.769	0.196	-	4.020	0.47	0.92	2.5	639.0
81	54.48	0.02	2.77	0.90	1.44	0.07	16.84	23.31	0.93	0.01	100.19	1.955	0.001	0.117	0.026	0.043	0.002	0.901	0.896	0.065	0.001	4.006	0.49	0.95	2.0	696.4
82	54.35	0.36	3.87	1.88	1.40	0.06	15.27	20.96	2.40	-	100.24	1.951	0.010	0.164	0.053	0.042	0.002	0.818	0.806	0.167	-	4.014	0.48	0.95	2.0	570.9
83	54.80	0.23	3.08	1.77	1.95	0.06	15.54	20.79	2.31	-	100.76	1.971	0.006	0.130	0.050	0.059	0.002	0.833	0.801	0.161	-	4.013	0.47	0.93	2.7	674.4
84	54.68	0.13	2.73	0.92	1.60	0.06	16.26	22.56	1.52	-	100.82	1.968	0.004	0.116	0.026	0.048	0.002	0.872	0.870	0.106	-	4.011	0.49	0.95	2.0	573.3
85	55.18	0.07	1.23	0.79	1.41	0.05	17.45	23.68	0.79	-	100.48	1.983	0.002	0.052	0.023	0.042	0.001	0.935	0.912	0.055	-	4.005	0.48	0.96	3.2	685.6
86	54.79	0.21	2.68	1.80	2.07	0.06	15.81	20.96	2.14	-	100.80	1.973	0.006	0.114	0.051	0.062	0.002	0.848	0.809	0.149	-	4.014	0.47	0.93	3.0	710.2
87	54.92	0.11	2.66	1.16	1.52	0.06	16.14	22.15	1.72	-	100.16	1.975	0.003	0.113	0.033	0.046	0.002	0.865	0.854	0.120	-	4.009	0.48	0.95	2.3	595.3
88	54.40	0.34	3.89	1.91	1.44	0.06	15.20	20.64	2.59	-	99.99	1.955	0.009	0.165	0.054	0.043	0.002	0.814	0.795	0.181	-	4.017	0.48	0.95	2.0	554.1
89	54.13	0.25	3.80	1.23	1.51	0.07	15.71	21.71	1.93	-	99.49	1.948	0.007	0.161	0.035	0.045	0.002	0.843	0.837	0.135	-	4.014	0.49	0.95	1.7	588.0
90	54.62	0.06	2.62	1.72	1.82	0.06	16.15	21.35	1.98	0.01	100.21	1.969	0.002	0.111	0.049	0.055	0.002	0.868	0.825	0.139	-	4.019	0.47	0.94	2.8	676.5
91	55.11	0.11	2.58	1.10	1.51	0.06	16.29	22.20	1.73	-	100.59	1.976	0.003	0.109	0.031	0.045	0.002	0.871	0.853	0.121	-	4.011	0.48	0.95	2.4	597.1
92	54.66	0.26	3.69	0.84	1.49	0.04	15.92	21.56	2.02	-	100.69	1.960	0.007	0.156	0.024	0.045	0.001	0.851	0.829	0.141	-	4.013	0.48	0.95	1.7	614.1

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. A dash – below the detection limit.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 / APPENDIX 3

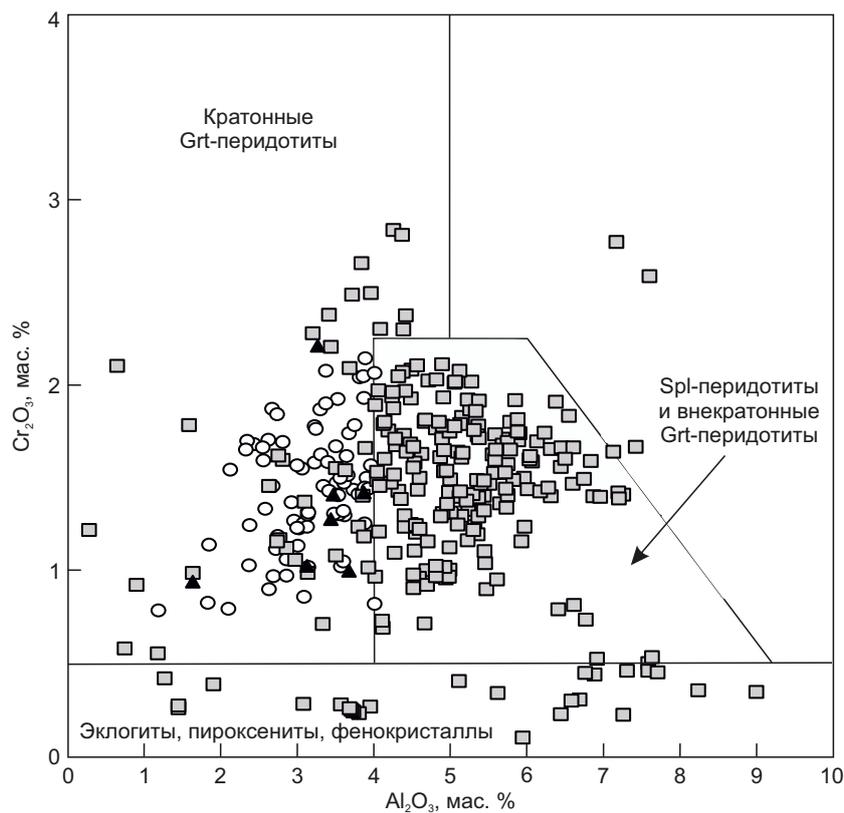


Рис. 3.1. Дискриминационная диаграмма $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [Nimis, Taylor, 2000] и состав изученных клинопироксенов из трубки Обнаженной. Квадраты – зерна, которые не прошли отбор по фильтрам из работы [Ziberna et al., 2016]; круги – зерна, использованные для реконструкции палеогеотермы; треугольники – зональные зерна.

Fig. 3.1. Discrimination diagram $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [Nimis, Taylor, 2000] and compositions of analyzed clinopyroxenes from the Obnazhennaya pipe. Squares are grains that did not pass the filters from [Ziberna et al., 2016]; circles are grains used for paleogeotherm reconstruction; triangles are zoned grains.