

Термальное состояние краевой части Сибирского кратона в мезозойскую эру кимберлитового магматизма Куойкского поля (Якутская алмазоносная провинция)

А. М. Дымшиц¹, Е. А. Муравьева², Н. С. Тычков², С. И. Костровицкий^{1,3}, И. С. Шарыгин¹,
А. В. Головин², О. Б. Олейников⁴

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: adymshits@crust.irk.ru

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

³Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

⁴Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 39

Поступила в редакцию 30.04.2023 г., принята к печати 13.07.2023 г.

Объект исследования. Ксенокристаллы клинопироксена из концентрата тяжелой фракции 14 кимберлитовых тел Куойкского поля (западная часть поля: Обнаженная, Рубин, Серая, Водораздельная, Второгодница, Антошка; центральная часть: Слюдянка, Скиф II; восточная часть: Ирина, Ноябрьская, Вечерняя, Люся, Дьянга, а также Жила 79) (Якутская алмазоносная провинция, Сибирский кратон). **Цель.** Реконструировать мантийные палеогеотермы под шестью кимберлитовыми трубками (Водораздельная, Обнаженная, Второгодница, Слюдянка, Дьянга, Жила 79), используя два независимых подхода. **Материалы и методы.** Исследован химический состав ксенокристаллов клинопироксена и оценены температуры и давления с помощью мономинеральной термобарометрии. Подгонка линии геотермы к набору *P-T* данных производилась двумя методами. Первый основан на модели Д. Хастерока, Д.С. Чепмена, второй на модели Д. Маккензи с соавторами. **Результаты.** Значение мощности литосферы в пределах погрешности согласуется для двух методов, а также сопоставимо с более ранними реконструкциями для трубок Второгодница, Дьянга и Обнаженная. Полученные результаты указывают на то, что в мезозойское время кимберлитового магматизма мощность литосферы в районе Куойкского поля составляла около 200 км. **Выводы.** Особенности химического состава ксенокристаллов клинопироксена указывают на неоднородность литосферной мантии. Разная глубинность выноса мантийного материала для отдельных кимберлитовых трубок Куойкского поля, которые были сформированы в узком временном диапазоне и расположены друг от друга в нескольких десятках километров, может быть связана с особенностями подъема кимберлитовой магмы к поверхности и наличием промежуточных магматических камер. В восточной части Куойкского поля в литосферной мантии больше гранатовых и гранат-шпинелевых перидотитов по сравнению с их количеством в центральной и западной частях, что может косвенно указывать на большую перспективность именно восточного блока на алмазность, где, в частности, расположена убогоалмазоносная трубка Дьянга. Отсутствие алмазов в других трубках Куойкского поля может быть связано с интенсивным метасоматическим преобразованием пород литосферной мантии в области “алмазного окна”, что подтверждается большим количеством высокотемпературных клинопироксенов на этих глубинах.

Ключевые слова: мантийная геотерма, клинопироксен, кимберлит, Сибирский кратон, литосферная мантия, термобарометрия

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10073, <https://rscf.ru/project/22-77-10073/>. Экспедиционные работы на кимберлитовой трубке Обнаженная выполнялись в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9) и ИГАБМ СО РАН

Thermal state of the Siberian craton marginal zone at the time of Mesozoic kimberlitic magmatism within the Kuoika field (Yakutian diamondiferous province)

Для цитирования: Дымшиц А.М., Муравьева Е.А., Тычков Н.С., Костровицкий С.И., Шарыгин И.С., Головин А.В., Олейников О.Б. (2023) Термальное состояние краевой части Сибирского кратона в мезозойскую эру кимберлитового магматизма Куойкского поля (Якутская алмазоносная провинция). *Литосфера*, 23(4), 515–530. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-515-530>

For citation: Dymshits A.M., Muraveva E.A., Tychkov N.S., Kostrovitsky S.I., Sharygin I.S., Golovin A.V., Oleinikov O.B. (2023) Thermal state of the Siberian craton marginal zone at the time of Mesozoic kimberlitic magmatism within the Kuoika field (Yakutian diamondiferous province). *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 515–530. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-515-530>

© А.М. Дымшиц, Е.А. Муравьева, Н.С. Тычков, С.И. Костровицкий, И.С. Шарыгин, А.В. Головин, О.Б. Олейников, 2023

Anna M. Dymshits¹, Elena A. Muraveva², Nikolay S. Tychkov², Sergey I. Kostrovitsky^{1,3},
Igor S. Sharygin¹, Alexandr V. Golovin², Oleg B. Oleinikov⁴

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov st., Irkutsk 664033, Russia, e-mail: adymshits@crust.irk.ru

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia

³A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, 1a Favorsky st., Irkutsk 664033, Russia

⁴Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, 39 Lenin av., Yakutsk 677000, Sakha Republic, Russia

Received 30.04.2023, accepted 13.07.2023

Research subject. Clinopyroxene xenocrysts from the heavy-mineral concentrates of 14 kimberlite bodies (western part of the field: Obnazhennaya, Rubin, Seraya, Vodorazdelnaya, Vtorogodnitsa, Antoshka; central part of the field: Sliudyanka, Skiff II; western part of the field: Irina, Noyabrskaya, Vechernyaya, Lyusya, Dianga and Zhila 79) of the Kuoika field (Yakutian diamondiferous province, Siberian craton). **Aim.** To reconstruct the mantle paleogeotherms Under the six kimberlite pipes (Vodorazdelnaya, Obnazhennaya, Vtorogodnitsa, Sliudyanka, Dianga, and Zhila 79) using two independent approaches. **Materials and methods.** The chemical composition of clinopyroxene xenocrysts was investigated and last equilibrium temperatures and pressures were estimated using single-crystal thermobarometry. The geothermal line fitting to the *P-T* data set was performed using two methods. The first method is based on the D. Hasterok and D.S. Champan model, and the second – on the D. McKenzie model. **Results.** The value of lithosphere thickness falls within the margin of error for the two methods, being also comparable with earlier reconstructions for the Vtorogodnitsa, Dyanga, and Obnazhennaya pipes. The obtained results indicate that, during the Mesozoic kimberlitic magmatism, the lithosphere thickness beneath the Kuoika field was about 200 km. **Conclusion.** The determined peculiarities of the chemical composition of clinopyroxene xenocrysts indicate heterogeneity of the lithospheric mantle composition. Different depths of transported mantle material for kimberlite pipes of the Kuoika field, which are coeval and are located a few km apart, may be related to peculiarities of kimberlite magma ascent to the surface and the presence of intermediate magma chambers. The eastern part of the Kuoika field contains more garnet and garnet-spinel peridotites compared to the central and western parts, which may indirectly indicate a greater diamondiferous potential of the eastern block, where the diamondiferous Dianga pipe is located. The absence of diamonds in other discovered pipes of the Kuoika field may be connected with the metasomatic enrichment of the lithospheric mantle in the area of the “diamond window”, which is confirmed by a large number of high-temperature clinopyroxenes at these depths.

Keywords: mantle geotherm, clinopyroxene, kimberlite, Siberian Craton, lithospheric mantle, thermobarometry

Funding information

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (No. 22-77-10073, <https://rscf.ru/project/22-77-10073/>). Field work was supported by the RF state assignment project for IGM SB RAS (No. 122041400157-9) and DPMGI SB RAS

ВВЕДЕНИЕ

Северные окраины Сибирского кратона, где на сегодняшний день обнаружено огромное количество кимберлитовых и кимберлитоподобных тел, остаются слабоизученными ввиду труднодоступности (Агашев и др., 2004; Howarth et al., 2014; Костровицкий и др., 2018; Ionov et al., 2018; Ащепков и др., 2019; Муравьева и др., 2022). Наибольший интерес представляет Куойкское кимберлитовое поле, в пределах которого была найдена убогоалмазаносная трубка Дьянга. В пределах данного поля зафиксировано более 100 проявлений кимберлитового магматизма, трубка Дьянга является единственной, где были обнаружены алмазы. В работе (Муравьева и др., 2022) реконструирована мантийная палеогеотерма под трубкой Обнаженная и показано, что значение мощности литосферы составляет около 190 км. Такие оценки мощности литосферы согласуются в пределах погрешности с данными публикации (Тычков и др., 2018) для двух других трубок Куойкского поля (Второгодница и Дьянга). В данных рабо-

тах материалом для исследования служили ксенокристаллы клинопироксена из концентрата тяжелой фракции. При этом рассчитанные значения мощности литосферы оказались близки между собой для всех трех кимберлитовых трубок, самые глубинные клинопироксены для трубки Обнаженная выносятся со 120 км, для трубки Второгодница – со 150, а для трубки Дьянга – уже со 180 км (Тычков и др., 2018).

Таким образом, встает вопрос о том, что может влиять на такой разброс глубин мантийного материала из кимберлитовых трубок, которые формировались в узком временном диапазоне и расположены друг от друга в нескольких десятках километров. Куойкское поле является не единственным примером, где близко расположены трубки с разным по глубинности и химическому составу ксеногенным материалом (Griffin et al., 1999; Nimis et al., 2020). Для ответа на этот вопрос необходимо иметь представительную выборку мантийного материала из разных трубок одного кимберлитового поля. В связи с этим в данном исследовании мы использовали ксенокристаллы клинопи-

роксена (>1200 шт.) из 14 кимберлитовых трубок Куойкского поля. На основе химического состава клинопироксенов и оценок давлений и температур был реконструирован термальный режим для литосферной мантии северной части Сибирского кратона на момент кимберлитового магматизма в мезозойскую эру. Сопоставление распределения ксенокристаллов клинопироксена с глубиной для разных трубок Куойкского поля позволило предложить возможные механизмы подъема кимберлитовой магмы в обозначенном регионе.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Фундамент Сибирского кратона подразделяется на четыре основные тектонические провинции: Анабарскую в центре, Оленекскую на северо-востоке, Тунгусскую на западе и Алданскую на юго-востоке (Розен и др., 2006, 2009). Кимберли-

товые поля располагаются в центральной (Анабарской) и северо-восточной (Оленекской) частях Сибирского кратона, которые в совокупности составляют Якутскую кимберлитовую алмазоносную провинцию.

Куойкское кимберлитовое поле располагается в бассейне р. Оленек в пределах Оленекского поднятия (Оленекская тектоническая провинция) (рис. 1). Южная граница поля проходит по р. Оленек, восточная – по р. Бээнчиму (левый приток р. Оленек). На севере граница поля проводится по северной окраине выхода трапповых пород, расположенных в междуречье рек Бээнчиму и Куойки, с западной стороны поле ограничено по водоразделу рек Кыран и Куойка. В пределах поля выявлено около 100 кимберлитовых тел. Кимберлитовые трубки размещаются среди осадочных пород свит нижнего кембрия (кесюсинской и еркекетской), подстилающих их доломитов палеопротерозойского возраста. Воз-

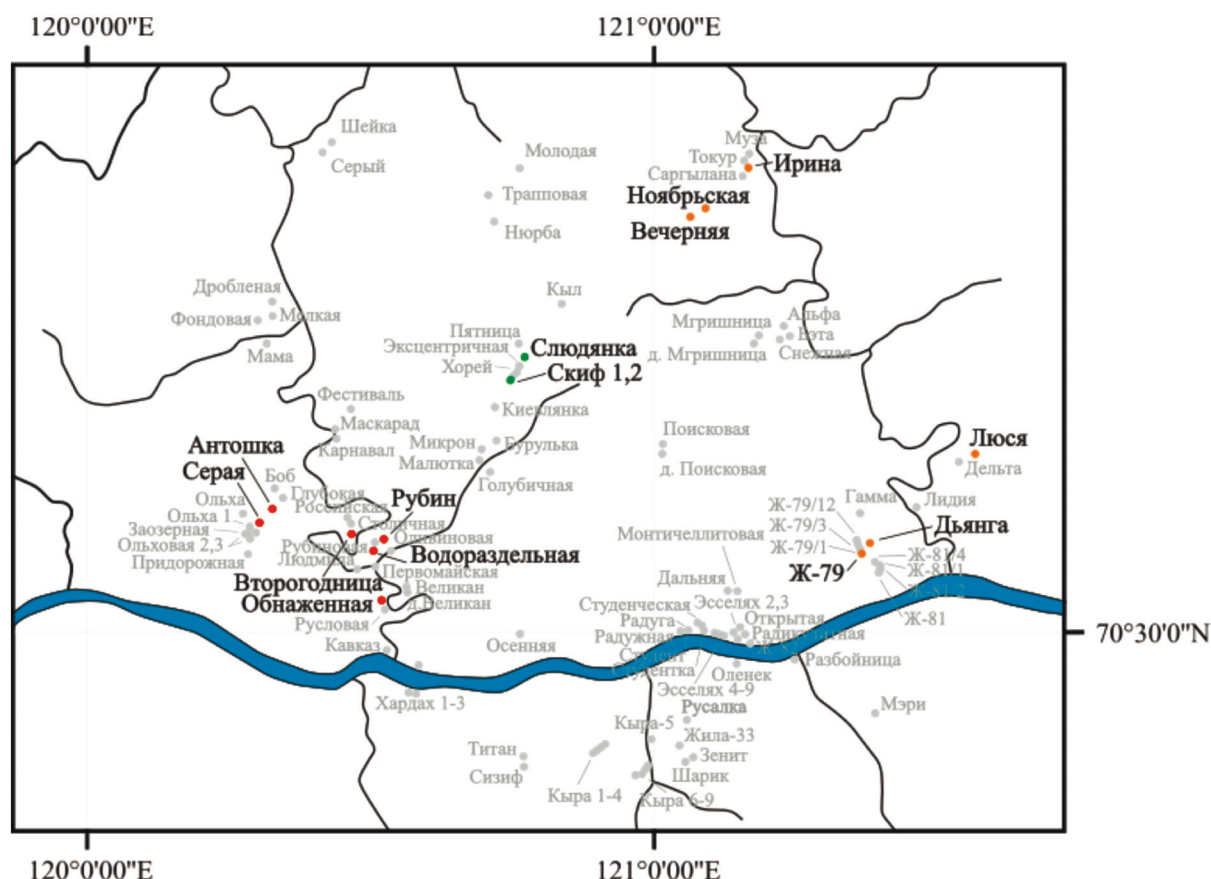


Рис. 1. Карта размещения кимберлитовых тел в Куойкском поле (на основе данных работы (Костровицкий и др., 2018)).

Цветом (в зависимости от части поля, западная – красный, центральная – зеленый, восточная – оранжевый) отмечены трубки, материал из которых использован в данной работе.

Fig. 1. Location map of kimberlite pipes in the Kuoika field (based on: (Kostrovitsky et al., 2018)).

The color (depending on the part of the field, the western part is red, the central part is green, the eastern part is orange) marks the pipes from which the material was used in this work.

раст формирования кимберлитов Куойкского поля был определен различными методами на основе U-Pb изотопной системы по цирконам и перовскитам (128–170 млн лет) (Kinny et al., 1997; Griffin et al., 1999; Sun et al., 2014) и методом треков по цирконам (147–165 млн лет) (Комаров, Илупин, 1990). Анализ флогопитов из единственной алмазоносной трубки Дьянга дает Rb-Sr изохронный возраст 157 ± 2 млн лет (Агашев и др., 2004).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе использованы химические анализы 1275 ксенокристаллов клинопироксена из 14 трубок Куойкского поля (западная часть поля: Обнаженная, Рубин, Серая, Водораздельная, Второгодница, Антошка; центральная: Слюдянка, Скиф II; восточная: Ирина, Ноябрьская, Вечерняя, Люся, Дьянга, а также Жила 79), отобранных из тяжелой фракции шлиховых проб из кимберлитов. Для каждого зерна проведено 1–3 измерений и рассчитано среднее значение. Содержания главных и примесных элементов в клинопироксенах определялись на электронно-зондовых микроанализаторах JEOL JXA-8230 (ЦКП “Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск) и JEOL JXA-8200 (ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск) с пятью спектрометрами с волновой дисперсией. Все детали съемки подробно описаны в работах (Костровицкий и др., 2021; Муравьева и др., 2022). Химические составы для ксенокристаллов клинопироксена тщательно отбраковывались в соответствии со схемой, представленной в работе (Ziberna et al., 2016), так как не любой пироксен может быть использован для мономинеральной термобарометрии. Если не провести отбраковку зерен, не относившихся в мантии к гранатовым перидотитам, для которых и был построен термобарометр, есть вероятность получения ложных оценок давлений и температур. Таким образом, микрозондовые анализы клинопироксенов должны соответствовать следующими критериями: сумма анализа должна быть в пределах 99–101 мас. %; при расчете формулы клинопироксена на 6 атомов кислорода сумма катионов должна быть в пределах 3.98–4.02. Оценка принадлежности клинопироксенов к мантийным гранатовым перидотитам производится на основе дискриминационной диаграммы $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$. Исключаются зерна с Al_2O_3 и MgO , мас. %: $0.7 < \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 12.175 - 0.6375 \cdot \text{MgO}$ в соответствии с дискриминационной диаграммой (Nimis, 2002), поскольку такие клинопироксены могут попадать в область перидотитов, подвергшихся значительным метасоматическим преобразованиям, и показывать ложные значения $T\text{--}P$. Для корректной работы ба-

рометра необходимо учитывать диапазон хромистости клинопироксенов, при котором он был откалиброван ($0.1 < \text{Cr\#} = \text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) < 0.65$). Основной блок барометра составляет активность хрома в клинопироксене. Слишком низкие значения могут искажаться погрешностью метода при микрозондовых измерениях, поэтому предлагается использовать только те зерна, для которых $a\text{Cr}/\text{Cr\#} > 0.011$. Сложно оценить равновесие клинопироксена с ортопироксеном по химическому составу, однако предлагается исключать в связи с этим зерна, для которых $\text{Ca\#} = \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg}) > 0.5$. Данная схема позволяет выбрать зерна клинопироксенов, находившиеся в равновесии с гранатом, ортопироксеном, и поэтому пригодные для расчета давления и температуры с использованием мономинерального термобарометра (Nimis, Taylor, 2000).

Подгонка линии геотермы к набору $P\text{--}T$ данных производилась двумя методами. Первый базируется на модели (Hasterok, Champan, 2011), второй – на модели (McKenzie et al., 2005). Второй метод лежит в основе программы построения геотерм FITPLOT (Mather et al., 2011). В работе (Hasterok, Chapman, 2011) авторы рассчитали набор континентальных геотерм, используя обобщенную модель теплогенерации и результаты теплопроводности из серии лабораторных исследований. Процедура построения геотерм в данной публикации была следующей: для каждой $P\text{--}T$ точки для ксенокристаллов пироксена рассчитывали значение теплового потока, а также среднее значение и стандартное отклонение. Затем методом наименьших квадратов определялась оптимальная геотерма с соответствующим тепловым потоком.

Построение палеогеотермы в программе FITPLOT производится с использованием параметров толщины и теплогенерации земной коры, оцененных для изучаемой области и набора $P\text{--}T$ данных, полученных для ксенокристаллов клинопироксена (Mather et al., 2011). Теплогенерация в мантии принималась равной 0, как рекомендовано в работе (Mather et al., 2011) при подгонке палеогеотерм в области субкратонной литосферной мантии. Потенциальная температура мантийной адиабаты на поверхности была принята равной 1315°C. Толщина верхней и нижней коры составила 30 и 12 км в соответствии с оценками в районе Куойкского поля (Pavlenkova, Pavlenkova, 2006), ее теплогенерация – 0.760 и 0.076 мВт/м³ для коровых пород Анабарского щита (Розен и др., 2009). Программа FITPLOT определяет толщину литосферы как пересечение рассчитанной кондуктивной геотермы с адиабатой конвектирующей мантии, а также позволяет определить значение поверхностного теплового потока. По пересечению линии палеогеотермы с линией графит–алмаз (Day, 2012) и линии перехода литосфера–астеносфера оценивается мощность так называемого “алмазного окна”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего в данном исследовании было изучено 1275 зерен клинопироксена. Количество изученных зерен указано в скобках, для западной части поля оно составило: Обнаженная (461), Рубин (16), Серая (11), Водораздельная (57), Второгодница (183), Антошка (6); для центральной: Слюдянка (42), Скиф II (5); для восточной: Люся (1), Дьянга (269), Жила 79 (173), Вечерняя (1), Ноябрьская (18), Ирина (32). Химические составы клинопироксенов показали вариации по магнезиальности от 75 до 94%, причем среднее значение $Mg\#$ для трубок западной части поля оказалось ниже, чем в восточной, что, в частности, стало причиной их разделения помимо географического расположения (табл. 1). Высокие содержания хрома наблюдаются в трубках восточной части поля. Трубки Дьянга, Ирина и Жила 79 показывают вариации среднего значения Cr_2O_3 от 2.00 до 2.41 мас. %. Для западной части поля среднее значение для этого оксида составляет 1.01 мас. %, при этом наиболее высокие содержания отмечаются только для трубок Водораздельная (1.78 мас. %) и Второгодница (1.84 мас. %). Содержание TiO_2 , которое может указывать на метасоматическое воздействие высокотемпературными флюидами/расплавами, составляет для западной и центральной части поля 0.29–0.34 мас. %, в то время как для восточной – 0.15 мас. %.

Химический состав ксенокристаллов клинопироксена был описан на основе дискриминационной диаграммы из работ (Ramsay, Tompkins, 1994; Nimis, 2002). На данной диаграмме выделяются поля гранатовых, гранат-шпинелевых, шпинелевых и внекратонных перидотитов, а также поля эклогитов, мегакристовой ассоциации и фенокристов в координатах Cr_2O_3 – Al_2O_3 (рис. 2).

В западной части поля (Обнаженная, Рубин, Серая, Водораздельная, Второгодница, Антошка), вдоль р. Куойка, большое количество клинопироксенов попадает в область шпинелевых перидотитов, эклогитов и мегакристовой ассоциации. Высокие содержания пироксенов из гранатовых и гранат-шпинелевых перидотитов наблюдаются только в трубках Второгодница и Водораздельная. В центральной части поля (трубки Скиф II, Слюдянка) также небольшое количество клинопироксенов относится к гранатовым перидотитам. Для трубок восточной части Куойкского поля отмечается преобладание клинопироксенов из гранатовых и гранат-шпинелевых перидотитов (особенно для трубок Люся, Дьянга, Ирина, Жила 79).

Часть трубок была исключена из построения мантийных палеогеотерм, так как в них либо полностью отсутствуют клинопироксены из гранатовой перидотитовой ассоциации (трубки Рубин, Ноябрьская, Вечерняя, Антошка, Скиф II), либо они оказались непригодными для мономинеральной

термобарометрии согласно фильтрам из работы (Ziberna et al., 2016). Всего из 1275 зерен все фильтры на основе химического состава прошли 309 клинопироксенов (24%).

Всего было построено 12 мантийных палеогеотерм с использованием двух разных подходов (рис. 3, 4) для 6 трубок Куойкского кимберлитового поля. Значения поверхностного теплового потока и мощности литосферы для изученных трубок представлены в табл. 2. Для первого подхода, основанного на модели (Hasterok, Champan, 2011), значения поверхностного теплового потока варьируют от 37.4 до 38.6 мВт/м², мощности литосферы – от 197 км (трубка Обнаженная) до 213 км (трубка Слюдянка). Построение геотерм с использованием второго подхода (программного пакета FITPLOT) дает значения поверхностного теплового потока в диапазоне от 39.8 до 41.6 мВт/м², мощности литосферы от 183 км (трубка Обнаженная) до 210 км (трубка Слюдянка). В результате реконструкции палеогеотермы для всего Куойкского поля на основе мантийного материала из 6 трубок были получены следующие значения теплового потока и мощности литосферы: 37.8 (40.2) мВт/м² и 207 (202) км. В скобках приведены значения подгонки с помощью программы FITPLOT (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При построении палеогеотерм под трубками Куойкского поля было установлено, что мантийный материал только из части кимберлитовых тел может быть использован для реконструкции, так как для этого желательно иметь выборку хотя бы из 15–20 анализов. Из 14 кимберлитовых трубок достоверно температуры и давления для представительной выборки ксенокристаллов клинопироксена были рассчитаны только для 6.

Реконструкция палеогеотерм под трубками Куойкского поля с использованием модели (Hasterok, Champan, 2011) дает значения мощности литосферы (см. табл. 2), сопоставимые с величинами, полученными при подгонке на основе модели (McKenzie et al., 2005) (программа FITPLOT) (см. рис. 3, 4). В целом построения с помощью программы FITPLOT дают более горячие геотермы, что связано с особенностями исходных данных для их расчета. Значения мощности и теплогенерации верхней и нижней коры задаются вручную в программе FITPLOT на основе оценок для региона, где располагается Куойкское поле. В модели (Hasterok, Champan, 2011) такой возможности не предусмотрено.

Для большинства трубок мощность литосферы варьирует в пределах 200 км, что согласуется с расчетом для поля в целом (см. рис. 5). Такие значения были получены ранее для трубок Дьянга и Второгодница (Тычков и др., 2018). Выбивается значение, полученное для трубки Обнаженная, для

Таблица 1. Химические составы для выборки

Table 1. Chemical compositions

Трубка (количество анализов в выборке)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	#Mg
<i>Западная часть поля</i>										
Рубин (16)	52.42	0.47	1.89	0.27	8.95	0.23	16.18	19.38	0.24	76.3
min	51.08	0.28	1.47	0.01	7.35	0.12	14.59	17.77	0.19	
max	53.31	0.62	3.23	1.10	13.40	0.50	16.70	20.37	0.32	
S	0.65	0.10	0.44	0.27	1.85	0.10	0.59	0.82	0.04	
Серая (11)	52.54	0.41	2.03	0.53	7.08	0.21	15.94	20.30	0.60	80.1
min	50.44	0.12	0.07	0.00	1.53	0.09	14.74	18.64	0.21	
max	54.77	0.60	4.07	1.61	10.97	0.34	16.53	22.22	1.68	
S	1.37	0.15	1.03	0.57	2.96	0.09	0.59	0.93	0.62	
Водораздельная (57)	54.41	0.28	1.43	1.78	3.64	0.11	15.84	20.32	1.58	88.6
min	49.80	0.07	0.34	0.01	2.12	0.06	9.71	13.55	0.20	
max	56.05	0.95	9.81	4.29	13.98	0.34	16.82	22.19	5.55	
S	1.38	0.18	1.37	0.96	2.83	0.06	1.13	1.78	0.93	
Обнаженная (461)	53.84	0.31	4.26	1.40	1.75	0.06	15.44	20.47	2.16	94.0
min	51.80	0.00	0.27	0.11	0.00	0.00	12.10	0.27	0.05	
max	56.64	0.90	8.97	3.16	6.40	0.50	36.56	23.76	5.00	
S	0.62	0.19	1.44	0.49	0.98	0.03	2.46	2.73	0.86	
Антошка (6)	52.33	0.43	1.96	0.24	8.73	0.21	16.69	19.54	0.24	77.3
min	51.19	0.30	1.54	0.11	8.04	0.19	16.16	19.17	0.20	
max	53.21	0.62	3.05	0.38	9.94	0.24	17.30	19.85	0.29	
S	0.74	0.12	0.61	0.12	0.94	0.02	0.48	0.26	0.04	
Второгодница (183)	54.72	0.17	1.47	1.84	2.64	0.08	16.36	20.82	1.79	91.7
min	51.01	0.02	0.31	0.08	1.91	0.05	14.20	17.60	0.19	
max	55.88	0.54	4.10	3.65	12.58	0.32	17.58	22.59	3.88	
S	0.63	0.08	0.93	0.57	1.08	0.03	0.58	1.22	0.59	
Ср. знач. для запад-ной части	53.37	0.34	2.18	1.01	5.47	0.15	16.08	20.14	1.10	84.7
<i>Центральная часть поля</i>										
Скиф II (5)	51.97	0.43	1.69	0.10	9.32	0.19	15.93	19.44	0.21	75.3
min	51.77	0.28	1.47	0.05	8.11	0.16	15.3	18.31	0.2	
max	52.36	0.56	2.08	0.15	10.63	0.23	16.49	20.46	0.22	
S	0.24	0.11	0.27	0.04	1.05	0.03	0.47	0.82	0.01	
Слюдянка (42)	53.91	0.15	2.17	0.67	4.93	0.07	14.97	21.47	1.14	84.4
min	52.05	0.02	0.23	0.01	1.05	0.00	9.25	0.18	0.00	
max	55.14	0.43	6.99	1.72	14.07	0.14	32.53	23.92	2.99	
S	0.91	0.09	1.66	0.51	4.61	0.04	3.90	3.69	0.87	
Ср. знач. для цент-ральной части	52.94	0.29	1.93	0.38	7.13	0.13	15.45	20.45	0.67	79.9
<i>Восточная часть поля</i>										
Ноябрьская (18)	52.21	0.22	4.86	0.97	2.57	0.10	15.15	22.17	1.06	91.3
min	50.79	0.01	2.14	0.47	1.89	0.06	14.39	18.57	0.73	
max	53.93	0.62	6.61	1.71	3.72	0.13	16.68	23.16	2.14	
S	0.82	0.21	1.20	0.32	0.52	0.02	0.63	1.36	0.45	
Дьянга (269)	54.51	0.19	2.12	2.23	2.67	0.09	15.76	19.42	2.26	91.3
min	51.68	0.03	0.36	0.01	1.53	0.04	13.36	15.13	0.87	
max	55.60	0.47	5.36	4.97	5.75	0.17	18.86	22.70	4.79	
S	0.51	0.09	1.11	1.12	0.79	0.02	0.96	1.57	0.77	
Жила-79 (173)	54.46	0.12	2.07	2.40	2.59	0.07	16.16	19.35	2.32	91.8
min	49.80	0.01	1.10	0.72	0.15	0.00	1.01	2.55	0.42	
max	55.36	0.41	7.67	4.56	4.24	0.10	20.96	22.47	5.32	
S	0.48	0.08	1.05	0.85	0.38	0.01	1.00	1.60	0.65	
Ирина (32)	55.23	0.08	1.06	2.00	2.40	0.08	16.04	21.46	0.68	92.3
min	54.46	0.02	0.19	1.26	1.68	0.06	15.33	19.97	0.04	
max	56.19	0.17	2.72	3.52	3.50	0.12	16.94	22.57	2.27	
S	0.52	0.04	0.87	0.72	0.51	0.02	0.51	0.88	0.83	
Ср. знач. для восточ-ной части	55.23	0.08	1.06	2.00	2.40	0.08	16.04	21.46	0.68	91.7

Примечание. Первая строка – среднее значение, далее – минимальное (min) и максимальное (max) значение по выборке, стандартное отклонение (S) клинопироксенов из трубок Куойкского поля. Значения в скобках рядом – количество анализов.

Note. The first line – mean value, second and third – minimum (min) and maximum (max) values for the sample, standard deviation (S) of clinopyroxenes from Kuoyka field. Values in brackets are the number of analyses.

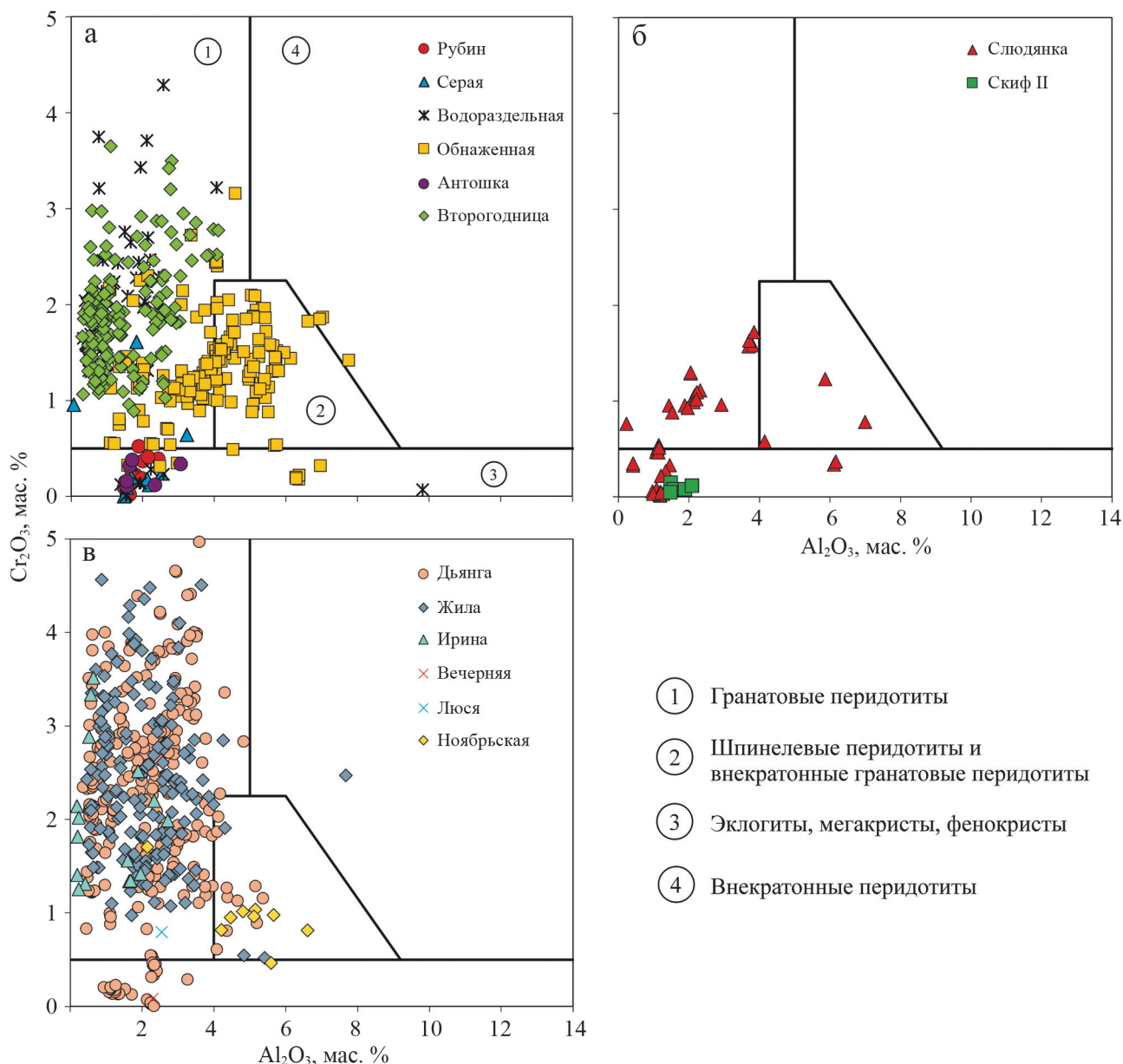


Рис. 2. Состав ксенокристаллов клинопироксена из кимберлитовых трубок Куойкского поля, нанесенных на дискриминационную диаграмму (Ramsay, Tompkins, 1994).

а – западная часть поля, б – центральная, в – восточная в соответствии с рис. 1.

Fig. 2. Composition of clinopyroxene xenocrysts from the Kuoika kimberlite pipes plotted on the discriminant diagram (Ramsay, Tompkins, 1994).

а – western part of the field, б – central, в – eastern part of the field following the Fig. 1.

которой мощность литосферы составила 183 км при подгонке с использованием программы FIT-PLOT, что тем не менее, в пределах погрешности (± 13 км), близко значению, полученному по модели (Hasterok, Champan, 2011), и сопоставимо с подгонкой из работы (Муравьева и др., 2022). Небольшая мощность литосферы (150 км), оцененная в работе (Howarth et al., 2014), противоречит резуль-

татам данной работы, а также наличию в этом поле алмазоносной трубки Дьянга. Как уже показано в статье (Муравьева и др., 2022), такая разница в результатах может быть связана с методическими особенностями при подгонке палеогеотерм. Кроме того, в нашей представительной выборке в других трубках имеются ксенокристаллы клинопироксена, вынесенные с глубин более 150 км (наиболее

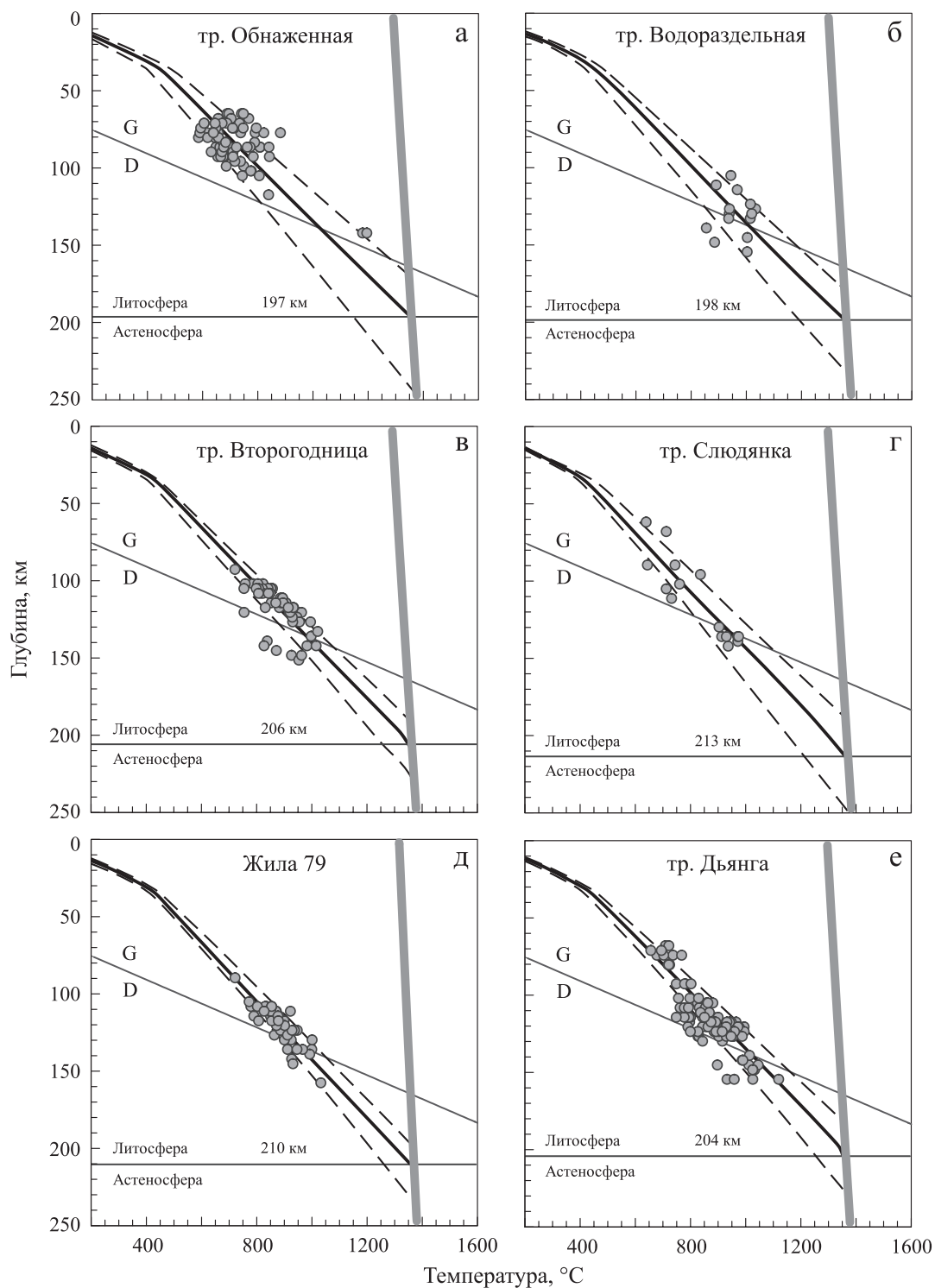


Рис. 3. Реконструированные палеогеотермы под трубками Куойкского поля на основе модели (Hasterok, Chapman, 2011).

Здесь и на рис. 4: круги – P - T параметры клинопироксенов; погрешность реконструкции геотерм – тонкие черные штриховые линии; толстая серая линия – мантийная адиабата.

Fig. 3. Constrains of the mantle paleogeotherms beneath the Kuoika kimberlite pipes based on the model (Hasterok, Chapman, 2011).

Here and in Fig. 4: circles – P - T parameters of clinopyroxenes; thin black dotted lines representing the error envelope; thick gray line is the mantle adiabat.

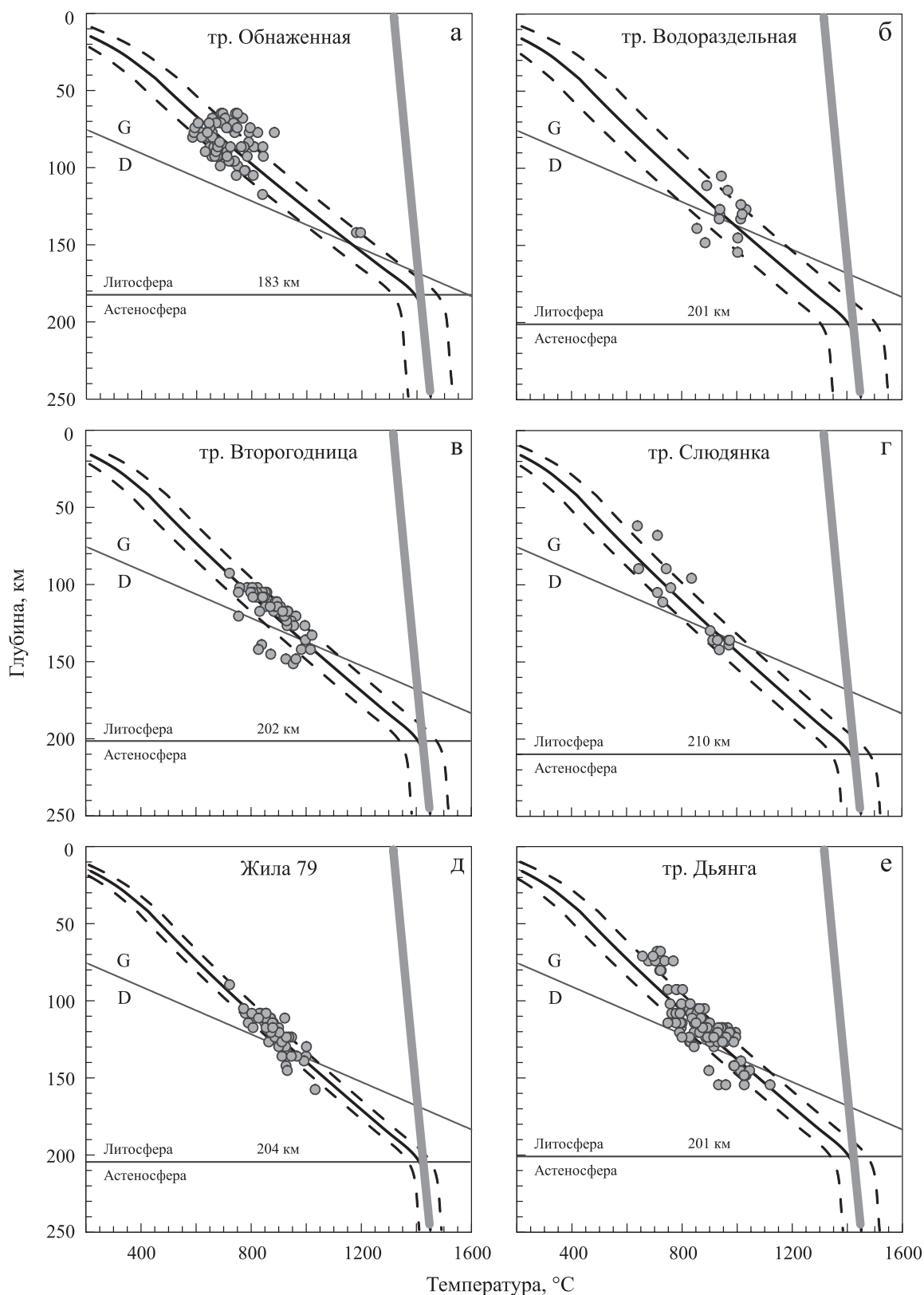


Рис. 4. Реконструированные геотермы под трубками Куойкского поля на основе модели (McKenzie et al., 2005).

Fig. 4. Constrains of the mantle paleogeotherms beneath the Kuoika kimberlite pipes based on the model proposed by (McKenzie et al., 2005).

Таблица 2. Результаты реконструкции палеогеотерм под кимберлитовыми трубками Куойкского поля**Table 2.** Reconstruction of the paleogeotherms beneath the Kuoika kimberlite pipes

Кимберлитовые трубки	(Hasterok, Chapman, 2011)		FITPLOT	
	LAB, км	LAB*, км	LAB*, км	SHF**, мВт/м
Куойкское поле***	207	202	202	37.8
Обнаженная	197	183	183	38.6
Второгодница	206	202	202	37.9
Водораздельная	198	201	201	38.5
Слюдянка	213	210	210	37.4
Жила 79	210	204	204	37.6
Дьянга	204	201	201	38.0

*LAB – граница литосферы и астеносферы.

**SHF – поверхностный тепловой поток.

***Расчет геотермы на основе данных по шести трубкам (см. рис. 5).

*LAB – boundary between lithosphere and asthenosphere.

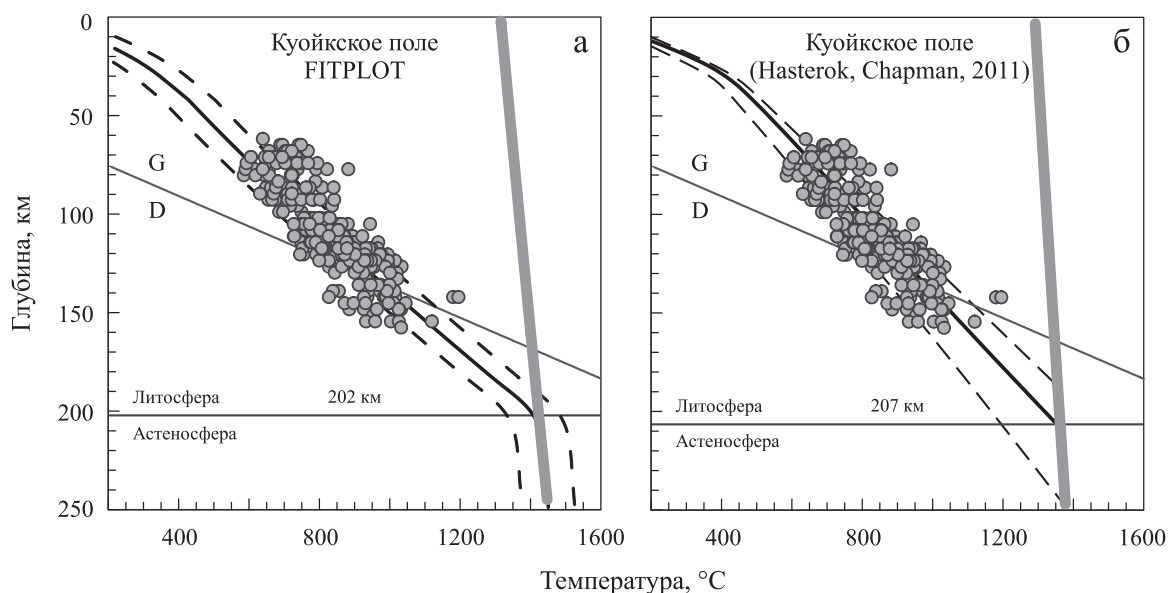
**SHF – surface heat flux.

***Geothermal calculation based on data from six pipes (see Fig. 5).

глубинные клинопироксены из тел Дьянга и Жила 79 вынесены со 160 км). Маловероятно, чтобы на небольшом расстоянии в пределах одного кимберлитового поля мощность литосферной мантии различалась в десятки километров.

Мантийные палеогеотермы, реконструированные для Далдынского, Мирнинского и Верхнемунского кимберлитовых полей, указывают на толщину литосферы в центральной части Сибирского

кратона около 210–230 км на момент палеозойского кимберлитового магматизма (Ziberna et al., 2016; Ащепков и др., 2019; Dymshits et al., 2020). Такая мощность литосферы и, как следствие, мощное “алмазное окно” хорошо согласуются с высокой алмазонасностью кимберлитовых трубок в данной части кратона. Участок литосферной мантии под Куойкским полем, где возможно существование алмазонасных мантийных пород, имеет мощность

**Рис. 5.** Сравнение первой (McKenzie et al., 2005) (а) и второй (Hasterok, Chapman, 2011) (б) моделей для мантийных палеогеотерм под Куойкским кимберлитовым полем.

Толстая серая линия – мантийная адиабата.

Fig. 5. Comparison of first (McKenzie et al., 2005) (a) and second (Hasterok, Chapman, 2011) (б) models for mantle paleogeotherms beneath the Kuoika kimberlite field.

The thick gray line is the mantle adiabat.

около 50 км (“алмазное окно”), однако только одна из трубок при этом содержит алмазы. Это может быть связано с особенностями состава пород литосферной мантии и способом их транспортировки кимберлитовыми магмами к поверхности.

Ксенокристаллы клинопироксена, использованные для термобарометрии, на P - T диаграммах ложатся для отдельных трубок в различных интервал глубин, а в целом для поля – укладываются в диапазон глубин 60–160 км (см. рис. 3–5). Наиболее широкие вариации по глубинам, с которых выносятся клинопироксены из перидотитов, показывают трубки восточной и центральной частей поля, а именно Жила 79 и трубки Слюдянка и Дьянга (около 70–90 км). Клинопироксены из остальных трубок (западная часть поля) попадают в более узкий интервал, который преимущественно соответствует верхней либо центральной части литосферной мантии. Это можно объяснить тем, что кимберлитовая магма при подъеме захватывала мантийный материал в ограниченном интервале глубин. Следовательно, кимберлитовая магма, поднимаясь к поверхности, могла до определенных глубин не захватывать мантийный материал, что, видимо, могло быть связано с ее реологическими свойствами.

Нельзя исключать, что перидотитовые клинопироксены присутствовали на больших глубинах в литосферной мантии Куойкского поля и были в нашей исходной выборке, но они не подошли для

мономинеральной барометрии, поэтому не отражены на P - T диаграммах. Для того чтобы клинопироксен мог быть использован для мономинеральной барометрии, в нем должен в значительной степени присутствовать компонент СаСг-Чермак, т. е. отношение Cr/Na в таких клинопироксенах должно быть высоким. Как отмечается в работе (Grütter, 2009), большими значениями отношения Cr/Na характеризуются клинопироксены из перидотитов с “деплетированными” характеристиками. В перидотитах, подвергшихся существенным метасоматическим преобразованиям под воздействием мантийных расплавов и флюидов, отношение трехвалентных катионов и щелочей, как правило, является близким к единице, и хром в таких клинопироксенах полностью присутствует в виде космохлорового компонента $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$. По этой причине подобные клинопироксены уже не будут пригодны для расчета давлений на основе их химического состава. Таким образом, расчет давлений для таких клинопироксенов производился с использованием уравнения геотермы в качестве барометра, полученного в данной работе для Куойкского поля (см. рис. 5а).

Распределение ксенокристаллов клинопироксена для трубок поля представлено на рис. 6. При этом получено, что магма из ряда тел могла выносить высокотемпературные клинопироксены с глубин 150–180 км.

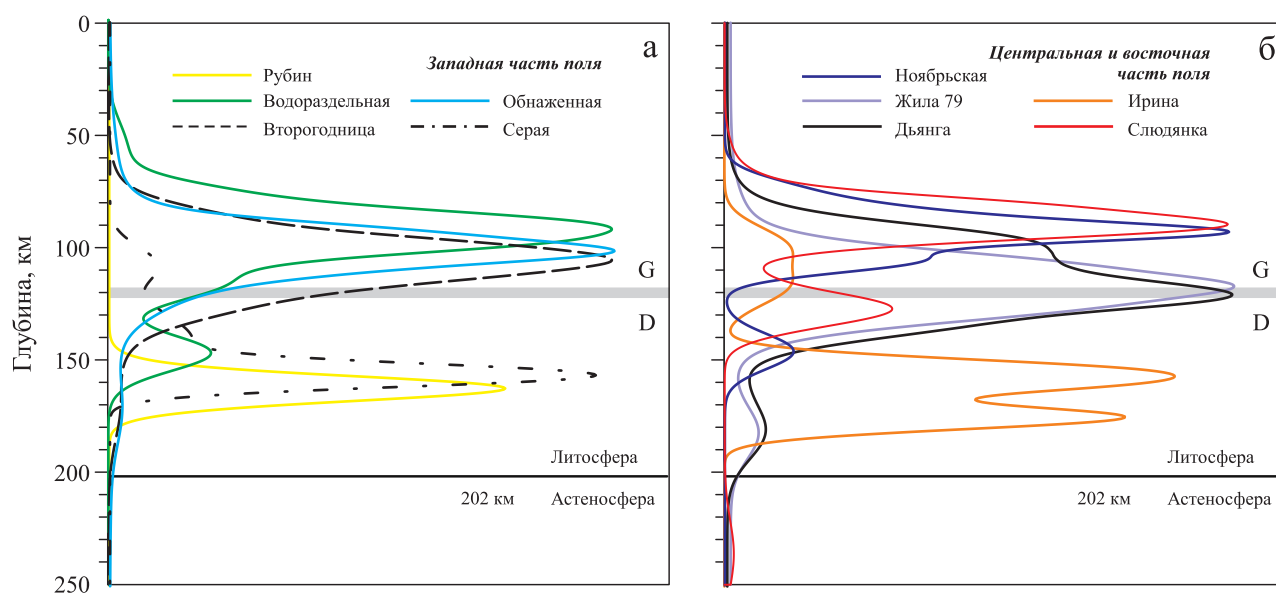


Рис. 6. Распределение ксенокристаллов клинопироксена с глубиной из кимберлитовых трубок Куойкского поля.

Толстая серая линия – фазовый переход графит (G)–алмаз (D).

Fig. 6. Depth distribution of clinopyroxene xenocrysts from the Kuoika kimberlite pipes.

The thick gray line is the graphite (G) – diamond (D) phase transition.

Основной пик распространенности клинопироксенов для большинства трубок наблюдается в области глубин 80–100 км. Для трубок, расположенных в восточной части поля (Дьянга, Жила 79, Ирина), он смещен уже ближе к линии перехода графит–алмаз на глубину 110–120 км. В работе (Костровицкий и др., 2018) высказано предположение, что восточная часть Куойкского поля, расположенная вдоль правого берега р. Беемчима, отличается наибольшими перспективами в отношении алмазности. Авторы делают такой вывод, так как четыре трубки из северо-восточной части поля – Муза, Токур, Ирина, Вечерняя, а также два кимберлитовых тела из восточной части – Дьянга и Жила 79 – выносят гранаты гарцбургит-дунитового алмазного парагенезиса и хромшпинелиды алмазного парагенезиса (Костровицкий и др., 2018). На основе состава клинопироксенов нашей выборки трубки данной части поля содержат больше гранатовых и гранат-шпинелевых перидотитов по сравнению с таковыми центральной и западной частей, что может, во-первых, подтверждать неоднородность состава литосферной мантии Куойкского поля; во-вторых, косвенно указывать на большую перспективность именно ее восточного блока на алмазность, где, в частности, располагается единственная на сегодняшний день алмазная трубка Дьянга.

Для некоторых трубок (Серая, Рубин, Дьянга, Слюдянка, Жила 79, Ирина) клинопироксены присутствуют в нижних горизонтах литосферной мантии и в пограничной области литосфера–астеносфера, но они оказались непригодны для термобарометрии. Эти пироксены могли быть захвачены из сильно измененных метасоматическими процессами пород либо представлять собой пироксены из мегакристовой ассоциации, что согласуется с их расположением в соответствующем поле на дискриминационной диаграмме (см. рис. 2). Образование сильно метасоматизированных пород в основании литосферной мантии может быть связано с триасовым трапповым магматизмом, влияние которого на породы литосферной мантии было описано в ряде работ (Pokhilenko et al., 1999; Howarth et al., 2014; Тычков и др., 2018).

Столь разнообразный диапазон глубин, с которых кимберлитовая магма захватывала мантийный материал в трубках, расположенных на достаточно близком расстоянии и относящихся к одному временному этапу кимберлитового магматизма, может указывать на то, что магма проходит сложный путь при подъеме к поверхности. Возможен ее подъем без остановок путем гидроразрыва, а в случае, когда прочность пород на фронте кимберлитовой магмы превышает давление в самой магме, возможна ее остановка с образованием промежуточной камеры. О возможной остановке кимберлитовой магмы на глубинах, соответствующих 90–100 км, дела-

ется вывод в работе (Ziberna et al., 2013) на основе мантийного материала из трубки Загадочная. Авторы показали, что максимальная глубина захвата мантийного материала здесь составляет 130 км и отражает глубину, с которой магма стала подниматься достаточно быстро, чтобы приводить к механической дезинтеграции мантийных пород и захвату ксенолитов (Wilson, Head, 2007). Остановка кимберлитовой расплава может косвенно подтверждаться наличием активно развитых келифитовых кайм по гранатам, что было предложено для трубок Намибии (Franz et al., 1996). Для Куойкского поля мощные келифитовые каймы по гранатам были установлены в трубке Обнаженная, что также может указывать на наличие промежуточной камеры в этом поле (Алифинова, 2015). Поэтому возможен сценарий, когда расплав поднимается без остановок от основания литосферной мантии (например, трубки Дьянга, Ирина или Жила 79). Магма для других трубок может проходить этап промежуточных камер и поэтому не выносит более глубокий материал, как, например, мы наблюдаем для трубки Обнаженная или Второгодница (рис. 7). Как следствие такой модели, близкорасположенные разновозрастные трубки могут быть контрастными по алмазности, составу и глубинности мантийного материала.

ВЫВОДЫ

1. Реконструкция мантийной палеогеотермы под Куойкским кимберлитовым полем была произведена на основе P - T оценок ксенокристаллов клинопироксена из шести трубок в программе FITPLOT и по модели (Hasterok, Champan, 2011). Значение мощности литосферы в пределах погрешности согласуется для двух моделей, а также сопоставимо с более ранними реконструкциями для трубок Второгодница, Дьянга и Обнаженная. Полученные результаты указывают на то, что в мезозое при проявлении кимберлитового магматизма мощность литосферы в районе Куойкского кимберлитового поля составляла около 200 км.

2. Литосферная мантия в восточной части Куойкского поля содержит больше гранатовых и гранат-шпинелевых перидотитов по сравнению с центральной и западной частями, что следует из дискриминационных диаграмм химического состава клинопироксенов и может подтверждать ее неоднородность, а также косвенно указывать на большую перспективность именно восточного блока на алмазность.

3. Убогая алмазность трубки Дьянга и отсутствие алмазов в других трубках Куойкского поля могут быть связаны с интенсивным метасоматическим преобразованием пород литосферной мантии в области “алмазного окна”, что подтверждается большим количеством высокотемпературных клинопироксенов на этих глубинах (см. рис. 6).

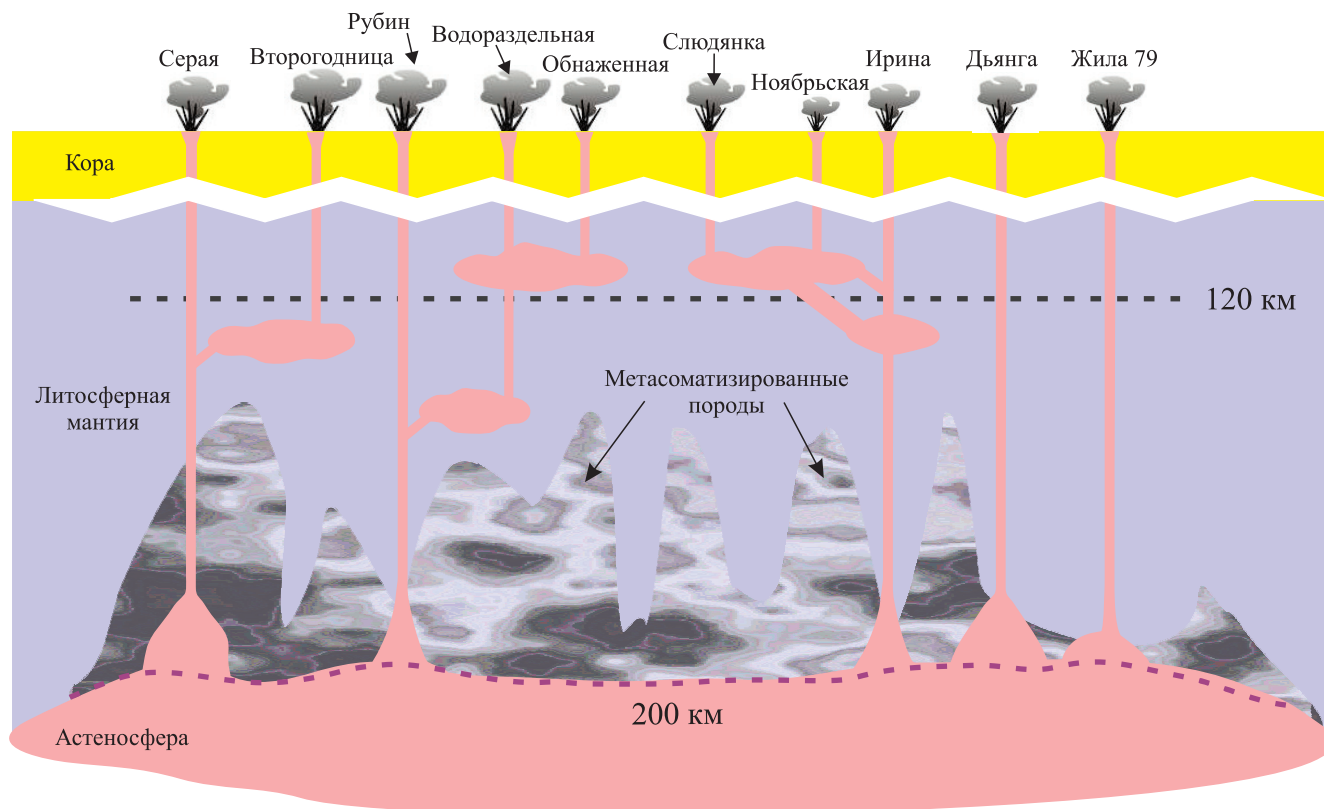


Рис. 7. Модель подъема кимберлитовой магмы в пределах Куойкского кимберлитового поля.

Предполагается подъем без остановок кимберлитовой магмы и с остановками с образованием промежуточной камеры (см. пояснение в тексте).

Fig. 7. Model of kimberlite magma ascent within the Kuoika kimberlite field.

For part of the pipes, the fast ascent from the base of the lithosphere–asthenosphere boundary is assumed, and for part of the kimberlite magma stoppage with the formation of an intermediate magma chamber is possible (see explanation in the text).

4. Разная глубинность выносимого мантийного материала для отдельных совозрастных кимберлитовых трубок Куойкского поля, расположенных друг от друга в нескольких десятках километров, может быть связана с особенностями подъема кимберлитовой магмы к поверхности. В частности, это может объясняться наличием промежуточных магматических камер, с глубины которых магма способна дезинтегрировать мантийный материал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. (2004) Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции. *Докл. АН*, **399**(1), 95-99.
- Алифиров Т.А. (2015) Продукты распада твердых растворов в гранатах и пироксенах: на материале мантийных ксенолитов из кимберлитов. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 247 с.
- Ащепков И.В., Иванов А.С., Костровицкий С.И., Вавилов М.А., Бабушкина С.А., Владыкин Н.В., Тычков Н.С., Медведев Н.С. (2019) Мантийные террей-
- ны Сибирского кратона: их взаимодействие с плюмовыми расплавами на основании термобарометрии и геохимии мантийных ксенокритов. *Геодинамика и тектонофизика*, **10**(2), 197-245. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0412>
- Комаров А.Н., Илупин И.П. (1990) Геохронология кимберлитов Сибирской платформы по данным метода треков. *Геохимия*, (3), 365-372.
- Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Специус З.В. (2018) Неоднородность литосферной мантии под северными полями Якутской провинции и алмазоносность кимберлитов. *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения*. Мат.-лы V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ-НИГП АК "АЛРОСА" (ПАО). (Ред. А.В. Толстов). Мирный: АЛРОСА, 114-118.
- Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Суворова Л.Ф., Демонтерова Е.И. (2021) Карбонатитоподобная порода дайки из кимберлитовой трубки Айхал, сравнение с карбонатитами участка Номохтоох (Прианабарье). *Геология и геофизика*, **62**(6), 747-764. <https://doi.org/10.15372/GiG2020121>

- Муравьева Е.А., Дымшиц А.М., Шарыгин И.С., Головин А.В., Логвинова А.М., Олейников О.Б. (2022) “Клинопироксеновая” палеогеотерма под кимберлитовой трубкой обнаженной: мощность литосферы под Куойкским полем (Сибирский кратон, Якутия). *Геодинамика и тектонофизика*, **13**(4). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0664>
- Розен О.М., Соловьев А.В., Журавлев Д.З. (2009) Термальная эволюция северо-востока Сибирской платформы в свете данных трекового датирования апатитов из керна глубоких скважин. *Физика Земли*, **10**, 79-96.
- Розен О.М., Невский Л.К., Жеравлев Д.З., Ротман А.Я., Специус З.В., Макеев А.Ф., Зинчук Н.Н., Мананков А.В., Серенко В.П. (2006) Палеопротерозойская аккреция на северо-востоке Сибирского кратона: изотопное датирование Анабарской коллизийной системы. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **14**(6), 3-24.
- Тычков Н.С., Юдин Д.С., Николенко Е.И., Малыгина Е.В., Соболев Н.В. (2018) Мезозойская литосферная мантия северо-восточной части Сибирской платформы по данным включений из кимберлитов. *Геология и геофизика*, **59**, 1564-1585.
- Day H.W. (2012) A revised diamond-graphite transition curve. *Amer. Miner.*, **97**, 52-62. <https://doi.org/10.2138/AM.2011.3763>
- Dymshits A.M., Sharygin I.S., Malkovets V.G., Yakovlev I.V., Gibsher A.A., Alifirova T.A., Vorobei S.S., Potapov S.V., Garanin 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>
- Franz L., Brey G.P., Okrusch M. (1996) Reequilibration of Ultramafic Xenoliths from Namibia by Metasomatic Processes at the Mantle Boundary. *J. Geol.*, **104**(5), 599-615. <https://doi.org/10.1086/629854>
- 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**, 1-35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0)
- Grütter H.S. (2009) Pyroxene xenocryst geotherms: Techniques and application. *Lithos*, **112**(2), 1167-1178. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2009.03.023>
- Hasterok D., Chapman D.S. (2011) Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **307**(1-2), 59-70. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2011.04.034>
- Howarth G.H., Barry P.H., Pernet-Fisher J.F., Baziotis I.P., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Bodnar R.J., Taylor L.A., Agashev A.M. (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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **224**, 132-153. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2017.12.028>
- Kinny P., Griffin B., Heaman L., Brakhfogel F., Spetsius Z. (1997) SHRIMP U-Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites. *Geolog. Geophys.*, **38**, 91-99.
- 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>
- McKenzie D., Jackson J., Priestley K. (2005) Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**(3-4), 337-349. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2005.02.005>
- Nimis P. (2002) The pressures and temperatures of formation of diamond based on thermobarometry of chromian diopside inclusions. *Canad. Miner.*, **40**(3), 871-884. <https://doi.org/10.2113/GSCANMIN.40.3.871>
- Nimis P., Preston R., Peritt S.H., Chinn I.L. (2020) Diamond's depth distribution systematics. *Lithos*, **376-377**. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105729>
- Nimis P., Taylor W.R. (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Pt I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **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., 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. *Proc. of the 7th Int. Kimberlite Conf.* Cape Town, Red Roof Design, **2**, 689-698.
- Ramsay R.R., Tompkins L.A. (1994) The geology, heavy mineral concentrate mineralogy, and diamond prospectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil. *Fifth International Kimberlite Conference, Minas Gerais, Brazil. V. 1B. Spec. Publ.* Minas Gerais, Brazil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 329-345.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **404**, 283-295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>
- Wilson L., Head J.W. (2007) An integrated model of kimberlite ascent and eruption. *Nature*, **447**, 53-57. <https://doi.org/10.1038/nature05692>
- 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. *Amer. Miner.*, **101**, 2222-2232. <https://doi.org/10.2138/am-2015-5540>
- Ziberna L., Nimis P., Zanetti A., Marzoli A., Sobolev N.V. (2013) Metasomatic Processes in the Central Siberian Cratonic Mantle: Evidence from Garnet Xenocrysts from the Zagadochnaya Kimberlite. *J. Petrol.*, **54**(11), 2379-2409. <https://doi.org/10.1093/PETROLOGY/EGT051>

REFERENCES

- Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Mal'kovets V.G., Sobolev N.V., Tolstov A.V., Polyanichko V.V. (2004) New age data on kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. *Dokl. Earth Sci.*, **399**, 1142-1145 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **399**(1), 95-99).
- Alifirova T.A. (2015) Decomposition products of solid solutions in garnets and pyroxenes: on the material of mantle xenoliths from kimberlites. Cand. geol. and min. sci. diss. Novosibirsk, IGM SO RAN, 247 p. (In Russ.)
- Ashchepkov I.V., Ivanov A.S., Kostrovitsky S.I., Vavilov M.A., Babushkina S.A., Vladyskin 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. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0412> (In Russ.)
- Day H.W. (2012) A revised diamond-graphite transition curve. *Amer. Miner.*, **97**, 52-62. <https://doi.org/10.2138/AM.2011.3763>
- Dymshits A.M., Sharygin I.S., Malkovets V.G., Yakovlev I.V., Gibsher A.A., Alifirova T.A., Vorobei S.S., Potapov S.V., Garanin 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>
- Franz L., Brey G.P., Okrusch M. (1996) Reequilibration of Ultramafic Xenoliths from Namibia by Metasomatic Processes at the Mantle Boundary. *J. Geol.*, **104**(5), 599-615. <https://doi.org/10.1086/629854>
- 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**, 1-35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0)
- Grütter H.S. (2009) Pyroxene xenocryst geotherms: Techniques and application. *Lithos*, **112**(2), 1167-1178. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2009.03.023>
- Hasterok D., Chapman D.S. (2011) Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **307**(1-2), 59-70. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2011.04.034>
- Howarth G.H., Barry P.H., Pernet-Fisher J.F., Baziotis I.P., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Bodnar R.J., Taylor L.A., Agashev A.M. (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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **224**, 132-153. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2017.12.028>
- Kinny P., Griffin B., Heaman L., Brakhfogel F., Spetsius Z. (1997) SHRIMP U-Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites. *Geol. Geophys.*, **38**, 91-99.
- Komarov A.N., Ilupin I.P. (1990) Geochronology of kimberlites of the Siberian platform according to the data of the track method. *Geokhimiya*, (3), 365-372. (In Russ.)
- Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Spetsius Z.V. (2018) Heterogeneity of the lithospheric mantle under the northern fields of the Yakutsk province and the diamond content of kimberlites. *Efficiency of Geological Exploration Works for Diamonds: Predictive-Resource, Methodological, Innovative-Technological Ways to Increase It*. Materials of the V All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the TsNIGRI Diamond Laboratory – NIGP PJSC ALROSA. Mirny, ALROSA Publ., 114-118. (In Russ.)
- Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Suvorova L.F., Demonterova E.I. (2021) Carbonatite-Like Rock in a Dike of the Aikhal Kimberlite Pipe: Comparison with Carbonatites of the Nomokhtookh Site (Anabar Area). *Rus. Geol. Geophys.*, **62**(6), 605-618 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **62**(6), 747-764). <https://doi.org/10.2113/RGG20194086>
- 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>
- McKenzie D., Jackson J., Priestley K. (2005) Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**(3-4), 337-349. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2005.02.005>
- 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 Kuoyka field (Siberian craton, Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics*, **13**(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0664>
- Nimis P. (2002) The pressures and temperatures of formation of diamond based on thermobarometry of chromian diopside inclusions. *Canad. Miner.*, **40**(3), 871-884. <https://doi.org/10.2113/GSCANMIN.40.3.871>
- Nimis P., Taylor W.R. (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Pt I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**, 541-554. <https://doi.org/10.1007/S004100000156>
- Nimis P., Preston R., Perritt S.H., Chinn I.L. (2020) Diamond's depth distribution systematics. *Lithos*, **376-377**. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105729>
- 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., 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. *Proc. of the 7th Int. Kimberlite Conf.* Cape Town, Red Roof Design, **2**, 689-698.
- Ramsay R.R., Tompkins L.A. (1994) The geology, heavy mineral concentrate mineralogy, and diamond prospectivity of the Boa Esperanca and Cana Verde pipes, Corrego D'anta, Minas Gerais, Brasil. *Fifth International Kimberlite Conference, Minas Gerais, Brazil. V. IB. Spec. Publ.* Minas Gerais, Brazil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 329-345.

- Rosen O.M., Soloviev A.V., Zhuravlev D.Z. (2009) Thermal evolution of the northeastern Siberian platform in the light of apatite fission-track dating of the deep drill core. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, **45**, 914-931 (translated from *Fizika Zemli*, **10**, 79-96). <https://doi.org/10.1134/S1069351309100085>
- Rosen O.M., Levskii L.K., Zhuravlev D.Z., Rotman A.Y., Spetsius Z.V., Makeev A.F., Zinchuk N.N., Manakov A.V., Serenko V.P. (2006) Paleoproterozoic accretion in the Northeast Siberian craton: Isotopic dating of the Anabar collision system. *Stratigr. Geol. Correlation*, **14**, 581-601 (translated from *Stratigrafiya. Geol. Korrelyatsiya*, **14**(6), 3-24). <https://doi.org/10.1134/S0869593806060013>
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **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). *Rus. Geol. Geophys.*, **59**, 1254-1270 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **59**, 1564-1585). <https://doi.org/10.1016/J.RGG.2018.09.005>
- Wilson L., Head J.W. (2007) An integrated model of kimberlite ascent and eruption. *Nature*, **447**, 53-57. <https://doi.org/10.1038/nature05692>
- Zibera L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V.G. (2016) Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia. *Amer. Miner.*, **101**, 2222-2232. <https://doi.org/10.2138/am-2015-5540>
- Zibera L., Nimis P., Zanetti A., Marzoli A., Sobolev N.V. (2013) Metasomatic Processes in the Central Siberian Cratonic Mantle: Evidence from Garnet Xenocrysts from the Zagadochnaya Kimberlite. *J. Petrol.*, **54**(11), 2379-2409. <https://doi.org/10.1093/PETROLOGY/EGT051>