



XENOLITH GARNETS FROM MIR KIMBERLITE PIPE: CHEMICAL COMPOSITION AND EVIDENCE OF METASOMATIC PROCESSES IN THE LITHOSPHERE MANTLE

T.V. Kalashnikova  , S.I. Kostrovitsky , K.A. Sinitsyn, E.E. Yudintseva

Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. This paper reports the results on the composition of lithosphere mantle under the Mirny kimberlite field. The authors investigated 57 samples of the mantle xenoliths collected from the Mir pipe. The samples were represented by peridotites (Grt lherzolites) and pyroxenites (Grt websterite, Grt clinopyroxenite and eclogite). The composition of minerals (garnet, clinopyroxene) and various rocks in the lithosphere mantle under the Mirny kimberlite field were analyzed based on petrographic features and chemical data. Besides, PT conditions of rock crystallization were calculated using different geothermobarometers. Garnets from peridotites and websterites show relatively high Mg# (75–83) and low TiO₂ contents (up to 0.2 wt. %). Since the eclogite has high-Ca (3.78–9.46 wt. %) and high-Fe (7.77–17.20 wt. %) garnet composition, it lies in the area of wehrlite paragenesis. In general, garnets from the lithosphere mantle under the Mirny kimberlite field have low-Ti garnet composition (up to 0.7 wt. %). Thus, the lithosphere mantle under the Mirny kimberlite field differs from the lithosphere mantle under other diamondiferous fields in a widespread development of eclogite and pyroxenite (up to 50 %), low-Ti composition of rocks, as well as virtual absence of deformed lherzolites. These signs probably indicate minor alteration of silicate metasomatism in the lithospheric mantle under the Mirny field (in contrast to the center of the Siberian craton).

KEYWORDS: garnet; Mir kimberlite pipe; lithosphere mantle

FUNDING: This research was funded by Russian Science Foundation (grant 20-77-00074 "Eclogite and garnet-pyroxenite xenoliths from kimberlite pipes of the Siberian craton – genesis and formation dating") (Garnet chemical analyses).

SHORT COMMUNICATION

Received: June 10, 2022

Revised: September 2, 2022

Correspondence: Tatiana V. Kalashnikova, kalashnikova@igc.irk.ru

Accepted: September 12, 2022

FOR CITATION: Kalashnikova T.V., Kostrovitsky S.I., Sinitsyn K.A., Yudintseva E.E., 2022. Xenolith Garnets from Mir Kimberlite Pipe: Chemical Composition and Evidence of Metasomatic Processes in the Lithosphere Mantle. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0661. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0661

ГРАНАТЫ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ МИР: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СВИДЕТЕЛЬСТВА МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

Т.В. Калашникова, С.И. Костровицкий, К.А. Сеницын, Э.Э. Юдинцева

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

АННОТАЦИЯ. Целью работы являлось изучение состава литосферной мантии под кимберлитовой трубкой Мир. Авторами была исследована коллекция мантийных ксенолитов из трубки Мир (57 образцов). Образцы представлены перидотитами (зернистые гранатовые лерцолиты) и пироксенитами (гранатовые вебстериты, гранатовые клинопироксениты и эклогиты). На основе данных по петрографическим особенностям, составу минералов (гранат, клинопироксен) составлена вещественная характеристика различных типов пород в литосферной мантии под кимберлитовой трубкой Мир, также с помощью различных геотермобарометров были рассчитаны P-T-условия кристаллизации пород. Гранаты из перидотитов отличаются относительно высокой магнезиальностью (75–83) и низким содержанием TiO_2 (до 0.2 мас. %). Эклогиты характеризуются высококальциевым (3.78–9.46 мас. %) и высокожелезистым (7.77–17.20 мас. %) составом граната, на диаграмме Н.В. Соболева попадая в область верлитового парагенезиса. В целом гранаты из литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем характеризуются низкотитанистым составом граната (до 0.7 мас. %), отличаясь от высокотитанистых гранатов Далдынского кимберлитового поля. Таким образом, литосферная мантия под Мирнинским кимберлитовым полем отличается от литосферной мантии под другими алмазоносными полями более широким развитием эклогитов и пироксенитов (до 50 %), низко-Ti составом пород и отсутствием деформированных лерцолитов. Данные признаки, вероятно, свидетельствуют о минимальном проявлении силикатного метасоматоза в литосферной мантии под кимберлитовой трубкой Мир (в отличие от центра Сибирского кратона).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гранат; кимберлитовая трубка Мир; литосферная мантия

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-00074 «Эклогитовые и гранат-пироксенитовые ксенолиты из кимберлитовых трубок Сибирского кратона – генезис и время формирования») (исследован химический состав граната).

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование строения и эволюции состава литосферной мантии под древними кратонами позволяет решать важнейшие проблемы петрологии верхней мантии, одной из которых является генезис алмазов. Существующие представления о вещественном составе литосферной мантии основаны главным образом на информации, полученной при изучении ксенолитов и отдельных барофильных минералов, выносимых магматическими расплавами из мантийных глубин. Состав литосферной мантии под различными кимберлитовыми полями Якутской провинции был изучен по коллекциям неизмененных мантийных ксенолитов, отобранных большей частью из трубок Удачная – Восточная из Далдынского поля и Обнаженная из Куойкского поля [Sobolev, 1974; Solov'eva et al., 1994; Ukhanov et al., 1988; Pokhilenko et al., 1999; Ionov et al., 2015; и др.]. К алмазоносным кимберлитовым полям Сибирского кратона относится Мирнинское кимберлитовое поле (Маганский террейн по [Rosen, 2003]). Следует отметить, что литосферная мантия под данным южным кимберлитовым полем отличается по химическому составу и мощности от алмазоносных Далдынского и Алакитского кимберлитовых полей, находящихся в центре кратона [Ukhanov et al., 1988; Ashchepkov et al., 2013]. Авторами была поставлена задача изучить

состав литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем на основе данных по петрографическим особенностям, составу минералов (гранат, клинопироксен). С помощью различных геотермобарометров были рассчитаны P-T-характеристики равновесия пород. Также были получены новые данные по изотопному составу кислорода в минералах из пироксенитов и эклогитов.

2. ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Была исследована коллекция мантийных ксенолитов из трубки Мир (57 образцов). Образцы представлены перидотитами (гранатовые лерцолиты) и гранатовыми пироксенитами (вебстериты, клинопироксениты и эклогиты). Большую часть отобранной коллекции (44 образца) составляют пироксениты.

Лерцолиты из трубки Мир характеризуются высокой степенью изменения, во многих образцах оливин и ортопироксен замещены серпентином (до 50–70 %). Вебстеритовые породы содержат клинопироксен и ортопироксен в виде отдельных зерен. Гранатовые пироксениты (вебстериты) характеризуются оранжево-красноватым цветом граната и темно-зеленым цветом пироксена, содержание которого достигает 30–40 %. Для пироксенитов характерны средне- и крупнозернистые структуры, гипидиоморфно-зернистые,

реже – порфиробластовые и гранобластовые (до мозаичных) микроструктуры. В клинопироксене часто наблюдаются структуры распада в виде ламелл ортопироксена и граната. В гранатах из клинопироксенитов также присутствует рутил в виде тонких (5–20 мкм) пластинок распада. Эклогиты представляют собой отдельную группу пироксенитовых пород и характеризуются гранобластовой структурой (до мозаичной), оранжевым или розоватым цветом граната. Вторичные изменения выражены в замещении оливина и пироксенов серпентином и хлоритом, а также в развитии по клинопироксену мелкозернистого агрегата амфибола и флогопита, наблюдается кристаллизация вторичного кальцита, целестина-барита, в некоторых образцах – сульфидов (пирита).

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Детальные минералогические исследования ксенолитов Мирнинского поля выполнены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» (Институт геохимии СО РАН). Содержание главных элементов в минералах определяли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMN (аналитики Ю.Д. Щербаков, Л.А. Павлова). Зерна анализируемых минералов были залиты в эпоксидные шашки с полированной поверхностью. Из изученных зерен были отобраны наиболее чистые и крупные, для которых использовали метод РСМА (EPMA) на электронно-микроскопическом анализаторе Jeol Superprobe JXA-8200 (Япония) (аналитик Л.Ф. Суворова). Использовался пятиволновой дисперсионный (WDX) спектрометр, ускоряющее напряжение пучка 20 кВ, ток пучка 20 нА, диаметр пучка 2–5 мкм. Набор природных и синтетических стандартов, используемых для калибровки, включал альбит (Na), пироп (Al), калиевый полевой шпат (K), диоксид (Si, Ca, Mg), оливин (Si, Mg, Fe), гранат (Si, Al, Fe, Mn), рутил (Ti), хромит (Cr, Fe). Время пикового и фонового измерения для каждого элемента составляло по 10 с, а аналитические ошибки обычно находились в пределах от 0.01 мас. % (для второстепенных элементов с содержанием, близким к соответствующим уровням определения) до 0.1–0.2 мас. %. Предел обнаружения методом EPMA составлял 0.05–0.04 мас. %.

Также был проанализирован изотопный состав кислорода. Для аналитических определений были отобраны крупные, наименее измененные образцы трубок эклогитов и пироксенитов. Анализ $\delta^{18}\text{O}$ в гранате и клинопироксене выполнен в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН на изотопном масс-спектрометре MAT 253 (Thermo Scientific, Германия) (аналитик Т.А. Веливецкая). Для разогрева проб и выделения кислорода из образцов в атмосфере пентафторида брома (BrF_5) использовалась лазерная система MIR 10-30 (New Wave Research, USA). Очистка выделенного кислорода произведена методом криогенного разделения, химическим методом с использованием KBr и хроматографическим методом на капиллярной колонке MOLSIV (длина 25 м,

внутренний диаметр 0.32 мм, рабочая температура 40 °C). Измерения выполнены относительно лабораторного стандартного газа O_2 , калиброванного по международному стандарту NBS-28 и стандарту гранат UWG-2 [Valley et al., 1995]. Вес анализируемых образцов ~1 мг. Результаты измерений $\delta^{18}\text{O}$ даны в отношении к международному стандарту VSMOW. Точность метода составляет 0.1–0.3 ‰. Стандартное отклонение значений для образцов в среднем ± 0.1 ‰ ($n=10$) для стандартов и образцов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В различных типах пород из ксенолитов трубки Мир был изучен химический состав минералов (Прил. 1, табл. 1.1, 1.2). Полученные аналитические данные по химическому составу граната и литературные данные приведены на рис. 1. На дискриминационной диаграмме Н.В. Соболева гранаты из лерцолитов и гранатовых клинопироксенитов попадают в основном в область лерцолитового парагенезиса, отличаясь средними значениями содержания CaO (3.68–5.35 мас. %) и Cr_2O_3 (0.07–3.70 мас. %). Гранаты из данных групп пород также отличаются относительно высокой магниальностью (75–83 мол. %) и низкими содержаниями TiO_2 (до 0.2 мас. %). Гранаты из вебстеритов отличаются широкими вариациями химического состава, попадая и в область лерцолитового, и в область верлитового парагенезиса, что показывает широкий диапазон условий их кристаллизации. Эклогиты характеризуются высококальциевым (3.78–9.46 мас. %), высокожелезистым (7.77–17.20 мас. %) и одновременно низкохромистым составом (до 0.3–0.4 мас. %) граната, на диаграмме Н.В. Соболева попадая в область верлитового парагенезиса. Следует отметить, что ни один из изученных составов гранатов из ксенолитов не попал в область алмазоносного высокохромистого дунит-гарцбургитового парагенезиса. Наши данные совпадают с литературными [Ukhanov et al., 1988; Beard et al., 1996].

В целом гранаты из литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем характеризуются низкотитанистым составом граната (до 0.7 мас. %). В отличие от Мирнинского поля, другие южные алмазоносные поля характеризуются в основном относительно высоким содержанием TiO_2 в гранатах (до 0.7–1.3 мас. %) и высоким значением Mg# (80.6–82.6 мол. %) [Solov'eva et al., 2008; Ukhanov et al., 1988]. При этом в Мирнинском поле практически не встречены деформированные гранатовые лерцолиты, которые широко распространены в трубке Удачной (до 60 %). Гранаты из деформированных лерцолитов трубки Удачной [Solov'eva et al., 2008; Ionov et al., 2010] резко отличаются от образцов из трубки Мир, демонстрируют широкий разброс значений по содержанию Cr_2O_3 (2–12 мас. %) и высокие содержания TiO_2 (до 1.5 мас. %). Предполагается, что деформированные лерцолиты являются результатом воздействия метасоматизирующих обогащенных расплавов из астеносферной мантии на деплетированные гарцбургиты. Таким образом, проявление

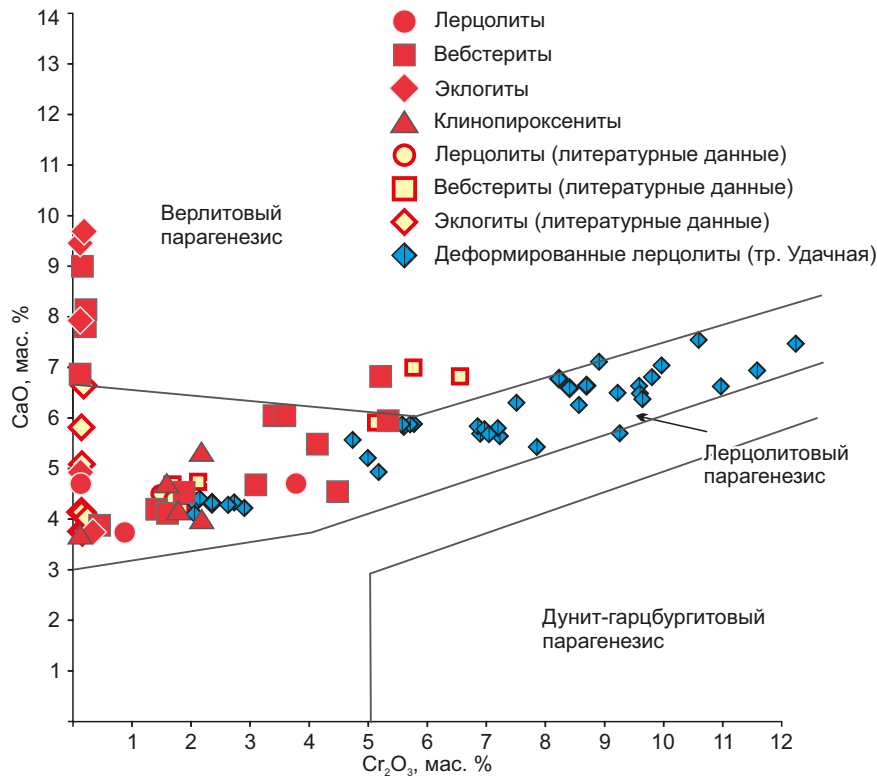


Рис. 1. Химический состав граната из ксенолитов трубки Мир. Диаграмма CaO – Cr₂O₃ по [Sobolev, 1974].

Красные значки – данные для мантийных ксенолитов из трубки Мир. Красно-желтые значки – лерцолиты и вебстериты по [Ukhanov et al., 1988], эклогиты – по [Beard et al., 1996]. Синие значки – деформированные лерцолиты из трубки Удачной [Solov'eva et al., 2008; Ionov et al., 2010].

Fig. 1. Chemical composition of garnet from Mir pipe xenoliths. CaO – Cr₂O₃ diagram according to [Sobolev, 1974].

Red signs – data for mantle xenoliths from the Mir pipe. Red-yellow signs – lherzolites and websterites [Ukhanov et al., 1988]; eclogites – [Beard et al., 1996]. Blue signs – garnet in deformed lherzolites from the Udachnaya pipe [Solov'eva et al., 2008; Ionov et al., 2010].

метасоматических процессов в литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем было не столь интенсивным, как под Далдынским полем.

Для четырех наименее измененных образцов пироксенитов и эклогитов был определен изотопный состав кислорода в гранате и клинопироксене. Результаты приведены в табл. 1. Значение $\delta^{18}\text{O}$ изменяется в клинопироксенах от 5.7–5.8 ‰ в клинопироксенидах до 6.1–6.2 ‰ в эклогитах, для граната значения варьируются от среднемантийных 5.3 ‰ до повышенных 5.9 ‰. В целом минералы из пироксенитов демонстрируют значения $\delta^{18}\text{O}$, близкие к мантийным [Mattey et al., 1994; Valley et al., 1998], что позволяет предположить кристаллизацию мегакристаллических пироксеновых кумулатов из астеносферных расплавов [Aulbach, Jacob, 2016]. Для минералов из эклогитов отмечены более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$, что может свидетельствовать о влиянии субдукционной компоненты в процессе формирования литосферной мантии под Мирнинским полем. В некоторых случаях (например, обр. 76-553) наблюдается $\delta^{18}\text{O}$ изотопное равновесие между гранатом и клинопироксеном. Мозаичная мелкозернистая структура данной породы позволяет предположить метаморфическую перекристаллизацию, которая привела к изотопному перераспределению.

Оценки температур равновесия (Прил. 1, табл. 1.3) производились по термометрам, основанным на обменных реакциях между гранатом и клинопироксеном ($\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}$) [Ai, 1994; Krogh, 1988, 2000; Ellis, Green, 1979]. Также использовался мономинеральный клинопироксеновый термометр [Nimis, Taylor, 2000]. Присутствие ромбического пироксена в некоторых образцах вебстеритов в структурах распада с сосуществующим гранатом позволило применить ортопироксен-гранатовые геотермометры [Brey, Köhler, 1990; Nickel, Green, 1985]. Отдельные рассчитанные геотермы теплового потока приведены по [Hasterok, Chapman, 2011]. На рис. 2 приведены данные по геотермометру [Ellis, Green, 1979], спроецированные на геотерму трубки [Howarth et al., 2014] и для образцов с измеренными составами ортопироксена [Brey, Köhler, 1990].

Вебстериты и лерцолиты показывают широкий разброс значений параметров кристаллизации (600–1200 °C; 2–6 ГПа), что, вероятно, связано с их постепенным охлаждением после магматической кристаллизации и образованием структур распада. Клинопироксениты характеризуются узкими вариациями P-T-параметров кристаллизации (812–960 °C; 3–4 ГПа), что, вероятно, свидетельствует об их более поздней кристаллизации из астеносферных расплавов. Эклогиты отличаются

Таблица 1. Изотопный состав кислорода $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW, ‰) в минералах из ксенолитов трубки Мир
Table 1. Oxygen isotopic composition $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW, ‰) in minerals from the Mir pipe xenoliths

№ пробы	Описание породы	Grt	Cpx
76-553	Гранатовый клинопироксенит	5.8	5.8
00-239	Гранатовый клинопироксенит	5.3	5.7
00-256	Эклогит мелкозернистый	5.9	6.1
01-116	Эклогит крупнозернистый	5.9	6.2
Средние мантийные значения		5.3 ± 0.3 [Valley et al., 1998]	5.57 ± 0.32 [Mattey et al., 1994]

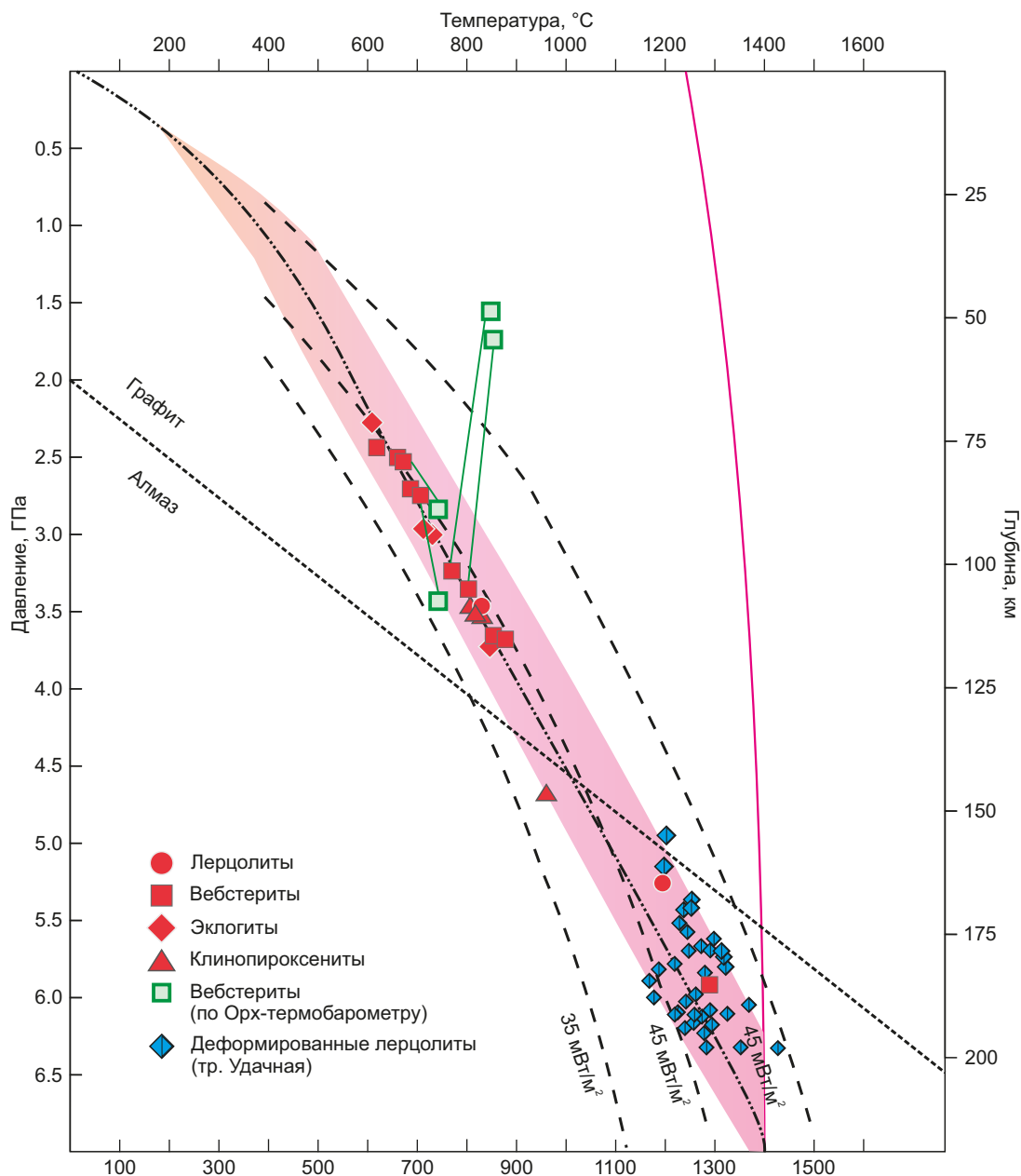


Рис. 2. Оценки P-T-условий формирования ксенолитов из трубки Мир.

Красное поле – геотерма для трубки Удачной по [Howarth et al., 2014]. Красные значки – значения по [Ellis, Green, 1979]; зеленые – по [Brey, Köhler, 1990; Brey et al., 1990]; синие – по [Solov'eva et al., 2008; Ionov et al., 2010].

Fig. 2. Estimates of the PT conditions for the xenoliths formation from the Mir pipe.

The red field is the geotherm for the Udachnaya pipe [Howarth et al., 2014]. Red signs – estimates for Mir pipe using [Ellis, Green, 1979]; green signs – websterites [Brey, Köhler, 1990; Brey et al., 1990]; blue signs – deformed lherzolites from the Udachnaya pipe [Solov'eva et al., 2008; Ionov et al., 2010].

относительно низкими рассчитанными параметрами температуры (720–840 °C; 2.2–3.7 ГПа), что может подтверждать их происхождение в зонах субдукции на небольших глубинах. Единичные значения полученных нами данных попадают в область стабильности алмаза. Применение Орх-термобарометра выявило два тренда кристаллизации ромбического пироксена. Кристаллизация отдельных зерен Орх в вебстеритах происходила раньше, чем Срх, что подтверждают более высокие P-T-параметры – выше на ~100 °C и ~0.5 ГПа (обр. 00-252 и 12-Мр-3). Второй тренд, который характеризуется резким падением давления при незначительном уменьшении температуры, – образование структур распада Орх в изначально гомогенном кристалле моноклинного пироксена (обр. 16-Мр-8 и 10-48).

При этом полученные нами данные резко отличаются от деформированных лерцолитов из трубки Удачной, которые предположительно являются результатом воздействия метасоматирующих расплавов на первоначальные зернистые перидотиты [Ionov et al., 2010, 2015; Solov'eva et al., 2008] и демонстрируют высокие P-T-параметры и признаки деформационной перекристаллизации. Подобных пород в Мирнинском кимберлитовом поле практически не обнаружено, что заставляет предположить отсутствие повышенного теплового потока. Рассчитанная толщина литосферы под Мирнинским полем составляет до 190 км, что значительно меньше, чем в центре кратона (до 220–240 км) [Pokhilenko et al., 1999; Griffin et al., 1999].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, литосферная мантия под кимберлитовой трубкой Мир отличается от литосферной мантии под другими алмазоносными полями более широким развитием эклогитов и пироксенитов (до 50 %), низким содержанием титана в породах и минералах и практическим отсутствием деформированных лерцолитов. Эклогиты из трубки Мир отличаются высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ (выше мантийных значений), что подтверждает их происхождение в зонах субдукции на небольших глубинах. Данные признаки, вероятно, свидетельствуют о минимальном проявлении силикатного метасоматоза в литосферной мантии под Мирнинским полем (в отличие от центра Сибирского кратона), что, возможно, в целом явилось благоприятным условием лучшей сохранности алмазов.

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

Ai Y., 1994. A Revision of the Garnet-Clinopyroxene Fe^{2+} -Mg Exchange Geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 115, 467–473. <https://doi.org/10.1007/BF00320979>.

Ashchepkov I.V., Vladykin N.V., Ntaflou T., Downes H., Mitchell R., Smelov A.P., Alymova N.V., Kostrovitsky S.I., Rotman A.Ya., Smarov G.P. et al., 2013. Regularities and Mechanism of Formation of the Mantle Lithosphere Structure beneath the Siberian Craton in Comparison with Other Cratons. *Gondwana Research* 23 (1), 4–24. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.03.009>.

Aulbach S., Jacob D.E., 2016. Major- And Trace-Elements in Cratonic Mantle Eclogites and Pyroxenites Reveal Heterogeneous Sources and Metamorphic Processing of Low-Pressure Protoliths. *Lithos* 262, 586–605. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.026>.

Beard B.L., Fraracci K.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Clayton R.A., Mayeda T.K., Sobolev N.V., 1996. Petrography and Geochemistry of Eclogites from the Mir Kimberlite, Yakutia, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 125, 293–310. <https://doi.org/10.1007/s004100050223>.

Brey G.P., Köhler T., 1990. Geothermobarometry in Four-Phase Lherzolites II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology* 31 (6), 1353–1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>.

Brey G.P., Köhler T., Nickel K.G., 1990. Geothermobarometry in Four-Phase Lherzolites. I. Experimental Results from 10 to 60 Kbar. *Journal of Petrology* 31 (6), 1313–1352. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1313>.

Ellis D.J., Green D.H., 1979. An Experimental Study of the Effect of Ca upon Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Exchange Equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 71, 13–22. <https://doi.org/10.1007/BF00371878>.

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).

Hasterok D., Chapman D.C., 2011. Heat Production and Geotherms for the Continental Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 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* 184–185, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.006>.

Ionov D.A., Doucet L.S., Ashchepkov I.V., 2010. Composition of the Lithospheric Mantle in the Siberian Craton: New Constraints from Fresh Peridotites in the Udachnaya-East Kimberlite. *Journal of Petrology* 51 (11), 2177–2210. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq053>.

Ionov D.A., Doucet L.S., Carlson R.W., Golovin A.V., Korsakov A.V., 2015. Post Archean Formation of the Lithospheric Mantle in the Central Siberian Craton: Re-Os and PGE Study of Peridotite Xenoliths from the Udachnaya Kimberlite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 165, 466–483. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.06.035>.

Krogh E.J., 1988. The Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Geothermometer – A Reinterpretation of Existing Experimental Data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99, 44–48. <https://doi.org/10.1007/BF00399364>.

Krogh Ravna E., 2000. The Garnet-Clinopyroxene Fe²⁺-Mg Geothermometer: An Updated Calibration. *Journal of Metamorphic Geology* 18 (2), 211–219. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00247.x>.

Mattey D., Lowry D., Macpherson C., 1994. Oxygen Isotope Composition of Mantle Peridotite. *Earth Planetary Science Letters* 128 (3–4), 231–241. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90147-3).

Nickel K.G., Green D.H., 1985. Empirical Geothermobarometry for Garnet Peridotites and Implications for the Nature of the Lithosphere, Kimberlites and Diamonds. *Earth and Planetary Science Letters* 73 (1), 158–170. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90043-3).

Nimis P., Grutter H., 2010. Internally Consistent Geothermometers for Garnet Peridotites and Pyroxenites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 154, 411–427. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0455-9>.

Nimis P., Taylor W.R., 2000. Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part 1, Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139, 541–554. <https://doi.org/10.1007/s00410000156>.

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. In: *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., 2003. The Siberian Craton: Tectonic Zonation and Stages of Evolution. *Geotectonics* 37 (3), 175–192.

Sobolev N.V., 1974. The Deep Inclusion from Kimberlites and the Problem of Upper Mantle Composition. Nauka, Novosibirsk, 263 p. (in Russian) [Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 263 с.].

Solov'eva L.V., Lavrent'ev Y.G., Egorov K.N., Kostrovitsky S.I., Suvorova L.F., 2008. The Genetic Relationship of the Deformed Peridotites and Garnet Megacrysts from Kimberlites with Asthenospheric Melts. *Russian Geology and Geophysics* 49 (4), 207–224. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.008>.

Solov'eva L.V., Vladimirov B.M., Dneprovskaya L.V., Maslovskaya M.N., Brandt S.B., 1994. The Kimberlites and Kimberlite-Like Rocks: Material of Upper Mantle beneath Ancient Platforms. Nauka, Novosibirsk, 256 p. (in Russian) [Соловьева Л.В., Владимиров Б.М., Днепровская Л.В., Масловская М.Н., Брандт С.Б. Кимберлиты и кимберлитоподобные породы. Вещество верхней мантии под древними платформами. Новосибирск: Наука, 1994. 256 с.].

Ukhanov A.V., Ryabchikov I.D., Kharkiv A.D., 1988. The Lithosphere Mantle of Yakutian Kimberlite Province. Nauka, Moscow, 298 p. (in Russian) [Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харьков А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. М.: Наука, 1988. 286 с.].

Valley J.W., Kinny P.D., Schulze D.J., Spicuzza M.J., 1998. Zircon Megacrysts from Kimberlite: Oxygen Isotope Heterogeneity among Mantle Melt. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 133, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004100050432>.

Valley J.W., Kitchen N., Kohn M.J., Niendorf C.R., Spicuzza M.J., 1995. UWG-2, a Garnet Standard for Oxygen Isotope Ratios: Strategies for High Precision and Accuracy with Laser Heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (24), 5223–5231. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00386-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00386-X).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Представительные составы граната из кимберлитовой трубки Мир (мас. %)
Table 1.1. Representative compositions of garnet (wt. %) from the Mir pipe xenoliths

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Лерцолиты											
00/223	40.66	<0.05	22.24	0.11	17.10	0.38	11.95	6.94	<0.04	<0.04	99.38
00/223	41.07	0.12	22.36	0.15	17.17	0.34	12.67	6.21	<0.04	<0.04	100.09
00/229	42.75	0.19	22.53	0.84	8.10	0.30	21.63	3.78	<0.04	<0.04	100.12
00/239	42.29	<0.05	22.91	0.07	10.50	0.30	18.39	4.82	<0.04	<0.04	99.27
00/239	42.37	<0.05	23.64	0.08	10.90	0.30	18.75	4.85	<0.04	<0.04	100.89
00/239	42.37	<0.05	23.64	<0.05	10.90	0.30	18.75	4.85	<0.04	<0.04	100.82
00/263	42.21	0.15	20.51	3.77	7.52	0.46	20.02	4.75	<0.04	<0.04	99.39
00/263	41.47	0.07	20.86	3.54	7.84	0.49	20.23	4.44	0.08	<0.04	99.01
01/139	40.95	0.16	18.25	5.25	11.62	0.54	15.69	6.76	<0.04	<0.04	99.22
01/139	40.86	0.13	18.43	5.21	11.88	0.50	15.52	6.87	<0.04	<0.04	99.40
01/139	39.41	0.38	21.61	0.08	18.45	0.33	9.94	9.52	0.16	<0.04	99.89
Вебстериты											
00/251	42.01	0.08	21.78	3.08	7.97	0.39	20.56	4.82	<0.04	<0.04	100.69
00/251	42.33	<0.05	21.15	3.10	8.06	0.40	20.25	4.73	<0.04	<0.04	100.02
00/252	41.67	0.15	19.81	4.45	7.43	0.42	19.71	5.72	<0.04	<0.04	99.36
00/252	41.05	0.16	19.18	5.35	8.11	0.49	19.09	5.99	<0.04	<0.04	99.42
00/261	41.56	0.10	21.91	1.79	10.10	0.39	19.37	4.52	<0.04	<0.04	99.74
01/116	42.52	0.07	23.87	0.34	7.48	0.27	21.20	3.86	0.09	<0.04	99.72
01/116	40.66	0.18	22.05	<0.05	17.71	0.36	11.10	8.14	<0.04	<0.04	100.19
01/116	40.76	0.09	22.03	<0.05	17.86	0.35	11.41	7.71	<0.04	<0.04	100.20
01/124	41.53	0.50	21.01	1.61	9.21	0.27	20.73	4.44	<0.04	<0.04	99.30
01/124	41.79	0.64	20.64	1.50	9.28	0.30	20.86	4.25	0.08	<0.04	99.34
12/Мр-3	41.23	0.19	22.65	0.06	11.39	0.23	13.92	10.70	0.08	<0.04	100.44
15/Мр-8	40.23	<0.05	19.84	3.40	14.62	0.59	15.43	6.10	<0.04	<0.04	100.21
15/Мр-8	41.32	0.50	22.17	0.11	12.98	0.24	13.83	9.09	0.14	<0.04	100.37
00/302-3	41.74	0.09	20.39	4.14	7.56	0.39	19.69	5.56	<0.04	<0.04	99.56
00/302-3	42.06	0.21	20.25	4.09	7.95	0.34	19.59	5.72	<0.04	<0.04	100.21
00/283	42.47	0.23	21.81	1.77	9.34	0.42	19.70	4.37	<0.04	<0.04	100.12
10/48	41.01	0.10	21.70	0.03	18.57	0.34	11.00	7.85	0.08	<0.04	100.70
10/48	39.98	0.15	21.83	0.01	18.66	0.35	11.17	7.98	0.07	<0.04	100.20
10/48	42.72	0.13	23.37	0.36	7.94	0.26	21.59	3.84	<0.04	<0.04	100.20
Клинопироксениты											
00/275	43.83	0.18	23.32	0.12	7.80	0.32	21.33	3.68	<0.04	<0.04	100.57
00/264	41.29	0.20	21.73	2.17	9.04	0.41	20.17	4.03	<0.04	<0.04	99.03
00/269	42.96	0.18	21.79	1.64	8.09	0.33	20.90	4.19	<0.04	<0.04	100.09
00/270	41.22	0.08	22.15	1.60	9.02	0.32	20.08	4.70	<0.04	<0.04	99.16
00/273	40.30	0.12	21.35	2.18	13.47	0.48	17.27	5.35	<0.04	<0.04	100.50
Эклогиты											
76/398	40.83	0.07	20.18	4.51	8.36	0.45	20.04	4.60	<0.04	<0.04	99.04
76/553	42.05	0.11	23.61	0.34	8.30	0.21	20.60	3.78	0.09	<0.04	99.10
76/553	42.85	0.10	23.91	0.38	8.77	0.22	20.81	3.69	0.07	<0.04	100.80
77/119	40.73	0.09	22.10	0.14	18.12	0.45	12.68	6.22	0.07	<0.04	100.60
77/119	40.40	0.02	22.07	0.14	17.30	0.46	13.27	6.69	0.07	<0.04	100.42
77/119	40.43	0.19	21.97	<0.05	17.20	0.35	11.43	7.89	<0.04	<0.04	99.45
00/256	41.80	<0.05	23.73	0.07	11.39	0.27	17.85	4.92	0.08	<0.04	100.13
00/256	41.81	<0.05	24.03	0.06	11.47	0.31	17.68	4.97	0.07	<0.04	100.39
00/256	42.21	0.08	22.85	0.13	7.54	0.20	16.72	9.46	<0.04	<0.04	99.19
00/256	42.08	0.08	23.01	0.11	8.03	0.21	16.91	8.98	<0.04	<0.04	99.41
00/256	42.39	0.10	23.00	0.10	7.77	0.19	16.60	9.46	<0.04	<0.04	99.60
00/256	41.72	0.08	23.49	<0.05	10.60	0.29	18.39	5.23	<0.04	<0.04	99.79

Таблица 1.2. Представительные составы клинопироксена из кимберлитовой трубки Мир (мас. %)**Table 1.2.** Representative compositions of clinopyroxenes (wt%) from the Mir pipe xenoliths

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Лерцолиты											
00/223	53.67	0.26	4.66	0.16	4.14	<0.05	13.90	20.23	2.46	<0.04	99.49
00/223	56.09	0.11	6.83	0.12	3.08	<0.05	12.07	17.10	4.13	<0.04	99.52
00/223	55.70	0.11	6.96	0.12	3.18	<0.05	12.21	17.09	4.15	<0.04	99.52
00/223	54.11	0.15	4.84	0.21	4.42	0.09	13.79	19.82	2.34	<0.04	99.77
00/229	55.16	0.34	5.36	0.81	1.49	<0.05	14.06	18.42	3.69	<0.04	99.32
00/239	56.00	<0.05	2.92	0.09	1.88	<0.05	16.14	21.46	1.54	<0.04	100.03
00/239	53.66	0.17	6.86	0.10	1.25	<0.05	13.79	19.89	3.69	<0.04	99.42
00/239	53.42	0.19	7.38	0.09	1.29	<0.05	13.44	19.58	3.82	<0.04	99.21
01/139	54.80	0.10	0.64	0.86	2.59	0.08	16.45	22.50	0.86	<0.04	98.96
00/285	55.34	0.28	4.25	1.21	1.38	<0.05	14.53	18.87	3.20	<0.04	99.05
00/285	55.84	0.23	4.45	1.36	1.38	<0.05	14.78	19.00	3.15	<0.04	100.20
Вебстериты											
00/251	54.50	0.55	0.86	1.82	2.99	0.10	16.32	21.97	1.24	<0.04	100.43
00/252	54.16	0.15	1.82	1.49	1.33	<0.05	16.08	21.69	1.40	<0.04	98.12
00/252	54.65	0.21	1.71	1.65	1.29	<0.05	16.05	21.85	1.39	<0.04	98.81
00/261	54.03	<0.05	0.77	0.83	2.71	0.06	17.47	23.01	0.95	<0.04	99.83
00/261	55.20	0.11	2.79	1.30	2.04	<0.05	15.12	20.53	2.21	<0.04	99.30
01/116	55.40	0.18	3.67	0.00	4.12	<0.05	14.40	20.28	2.40	<0.04	100.54
01/116	54.26	0.34	6.67	1.20	1.83	0.07	13.77	18.83	3.06	<0.04	100.02
01/124	55.37	0.14	1.98	0.46	4.14	0.12	18.93	17.16	1.38	<0.04	99.76
01/124	55.97	0.18	2.47	0.46	4.99	0.12	18.34	15.45	1.93	<0.04	99.99
12/Мр-3	53.93	0.05	0.47	0.27	3.60	0.07	17.18	23.24	0.56	<0.04	99.38
12/Мр-3	53.81	0.12	0.49	0.28	3.59	0.09	17.41	23.32	0.51	<0.04	99.62
15/Мр-8	52.54	<0.05	5.15	1.37	1.66	0.09	15.44	22.75	0.70	<0.04	99.70
00/302-3	54.46	0.27	3.56	2.55	1.21	<0.05	14.62	19.45	3.06	<0.04	99.18
00/302-3	54.49	0.37	3.51	2.69	1.16	<0.05	14.82	19.52	3.02	<0.04	99.57
00/302-3	54.57	0.27	3.71	2.72	1.35	<0.05	14.57	19.45	2.98	<0.04	99.61
00/302-3	54.99	0.24	3.41	2.50	1.27	<0.05	14.84	19.53	2.93	<0.04	99.71
10/48	55.10	0.27	4.73	0.35	1.43	<0.05	14.94	19.42	3.01	<0.04	99.26
00/283	55.05	0.24	4.20	1.17	1.39	<0.05	14.97	19.48	2.57	<0.04	99.06
Клинопироксениты											
00/264	55.45	0.33	4.72	1.90	1.65	<0.05	14.12	18.07	3.43	<0.04	99.67
00/264	55.14	0.30	4.54	1.76	1.55	<0.05	14.21	18.07	3.54	<0.04	99.11
00/270	55.59	<0.05	2.04	0.87	1.54	<0.05	16.49	21.62	1.50	<0.04	99.64
00/273	54.51	<0.05	0.53	0.45	3.06	<0.05	17.26	23.35	0.65	<0.04	99.81
00/273	54.54	<0.05	0.66	0.37	2.79	<0.05	17.38	22.88	0.56	<0.04	99.28
00/275	55.51	0.43	5.46	0.13	1.39	<0.05	13.80	18.85	3.32	<0.04	98.89
00/275	55.51	0.43	5.46	0.13	1.39	<0.05	13.80	18.85	3.32	<0.04	98.89
Эклогиты											
76/398	54.69	0.44	4.30	3.29	1.40	<0.05	13.57	17.82	3.83	<0.04	99.34
76/553	55.35	0.37	5.04	0.34	1.55	<0.05	14.53	19.10	3.29	<0.04	99.65
76/553	55.42	0.42	4.83	0.43	1.51	<0.05	14.69	19.40	3.10	<0.04	99.81
76/553	55.38	0.30	4.57	0.42	1.55	<0.05	14.60	19.32	3.04	<0.04	99.18
77/119	54.81	<0.05	0.50	0.28	3.68	0.10	16.74	22.95	0.46	<0.04	99.64
77/119	54.62	0.11	0.51	0.30	3.82	0.09	16.68	22.69	0.42	<0.04	99.35
77/119	56.01	0.11	6.69	0.14	3.10	<0.05	12.56	17.64	4.33	<0.04	100.61
00/256	54.64	0.21	7.52	0.13	1.24	<0.05	13.20	19.13	3.41	<0.04	99.57
00/256	55.22	<0.05	2.93	0.00	1.86	<0.05	16.00	21.87	1.60	<0.04	99.58
00/256	55.01	<0.05	2.81	0.05	1.90	<0.05	16.13	21.75	1.62	<0.04	99.42
00/256	55.78	<0.05	2.86	0.06	1.94	<0.05	15.18	21.99	1.59	<0.04	99.57

Таблица 1.3. Рассчитанные P-T-параметры равновесия ксенолитов из трубки Мир
Table 1.3. Calculated PT formation parameters of xenoliths from the Mir pipe

Образец	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
	NT	NT	EG	Геотерма	Krogh	Геотерма	Ai	Геотерма	BKN	BKN	BKN	NG
Лерцолиты												
00/223	764	9.3	818	34.7	630	24.9	604	22.4	-	-	-	-
00/229	957	34.9	1193	52.7	1094	48.4	1060	47.1	-	-	-	-
00/239	770	32.7	711	27.4	670	25.2	637	25	-	-	-	-
00/285	710	27.0	715	27.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Вебстериты												
00/251	687	29.9	712	27.5	711	27.4	665	25.1	-	-	-	-
00/252	689	27.8	676	25.1	646	24.8	611	22.7	730	28.8	736	33.3
00/261	708	13.1	862	36.7	862	37.1	795	39.1	-	-	-	-
01/116	769	14.6	620	24.3	790	34.7	785	32.4	-	-	-	-
01/124	1215	47.7	1285	60.7	1137	49.2	1115	48.9	-	-	-	-
12/Мр-3	759	34.4	694	27.1	847	36.5	853	36.8	742	34.8	770	36.6
15/Мр-8	834	15.2	810	33.7	550	19.2	530	17.2	847	15.3	840	9.9
00/302-3	619	22.3	671	25	637	25	668	23.9	-	-	-	-
10/48	736	13.9	850	36.7	638	25	585	22.1	855	17.3	860	17.1
00/283	822	25.5	773	32.4	614	23.1	574	22	-	-	-	-
Клинопироксениты												
00/264	800	27.7	966	46.7	825	35.2	780	31.9	-	-	-	-
00/270	842	36.6	813	34.8	668	25.1	633	24.1	-	-	-	-
00/273	850	30.1	824	35.2	696	27	674	25.4	-	-	-	-
00/275	841	11.7	812	34.8	732	30.1	692	27.1	-	-	-	-
Эклогиты												
76/398	655	27.1	845	37	714	27.5	672	25.4	-	-	-	-
76/553	523	10.3	610	22.8	585	22.1	560	19.2	-	-	-	-
77/119	809	12.7	731	30	679	19.3	687	18.4	-	-	-	-
00/256	726	9.0	720	29.7	638	24.7	614	22.7	-	-	-	-

Примечание. T – температура в °C; P – давление в кбар; NT – Cpx мономинеральный геотермобарометр [Nimis, Taylor, 2000; Nimis, Grutter, 2010]; EG – Mg-Fe Grt-Cpx термометр [Ellis, Green, 1979]; Krogh – Mg-Fe Grt-Cpx термометр [Krogh, 1988, 2000]; Ai – Mg-Fe Grt-Cpx термометр [Ai, 1994]; BKN – Mg-Fe Grt-Opx термобарометр [Brey, Köhler, 1990] – для образцов, в которых был измерен Opx; NG – Opx-Grt барометр [Nickel, Green, 1985] – для образцов, в которых был измерен Opx; Геотерма – проецирование на геотерму по [Howarth et al., 2014].

Note. T – temperature (°C); P – pressure (kbar); NT – Cpx monomineral geothermobarometer [Nimis, Taylor, 2000; Nimis, Grutter, 2010]; EG – Mg-Fe Grt-Cpx thermometer [Ellis, Green, 1979]; Krogh – Mg-Fe Grt-Cpx thermometer [Krogh, 1988, 2000]; Ai – Mg-Fe Grt-Cpx thermometer [Ai, 1994]; BKN – Mg-Fe Grt-Opx thermobarometer [Brey, Köhler, 1990] – for samples with analyzed Opx; NG – Opx-Grt barometer [Nickel, Green, 1985] – for samples with analyzed Opx; Geotherm – projecting to the geotherm by [Howarth et al., 2014].