



THERMOBAROMETRY OF DEPLETED PERIDOTITES

L.N. Pokhilenko ^{1✉}, V.N. Korolyuk ¹, N.P. Pokhilenko ^{1,2}

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

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. An assessment was made of the possibility of using olivine thermobarometry for xenoliths of depleted peridotites from the Udachnaya pipe (Yakutia), represented by 76 megacrystalline dunites and 5 megacrystalline harzburgites. Specially developed and tested method of microprobe analysis was used to determine Al and Ca microimpurities in the olivine samples studied. PT-parameters of megacrystalline dunite xenoliths were calculated using the equations of olivine, garnet, and olivine-garnet thermobarometers. Enstatite geobarometers were additionally used for some megacrystalline harzburgites. Comparison of the obtained data showed that the geothermobarometric pair of Finnerty-Rigden barometer (Ca in olivine) for wide PT-range peridotites and thermometer [Busseweiler et al., 2017] (Al in olivine) for garnet peridotites is most suitable for assessing the PT-parameters of the megacrystalline dunite collection studied, though some of the high PT-parameters (>60 kbar and 1200 °C) are questionable. Garnet barometer [Grütter et al., 2006] (CaO – Cr₂O₃ ratio in pyrope) does not always agree with olivine geothermometers. This may be caused by the necessity to adjust the barometer equations for a wider range of compositions, as well as by the possible imbalance between garnet and olivine. We admit that more accurate results can be obtained by using this barometer in combination with garnet thermometers based on the determination of Ni in garnet. There is not enough data on harzburgites to draw certain conclusions. However, it should be recognized that the traditional pair of McGregor enstatite barometer and O'Neill-Wood garnet-olivine thermometer still remains the most acceptable for estimating the PT-parameters of megacrystalline harzburgites, though with some temperature underestimation.

KEYWORDS: geobarometer; geothermometer; olivine; megacrystalline dunites; megacrystalline harzburgites; microimpurities; Udachnaya pipe

FUNDING: The work was carried as part of the state assignment of the IGM SB RAS (122041400157-9).



EDN: XESWVT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Lyudmila N. Pokhilenko, lu@igm.nsc.ru

Received: July 1, 2024

Revised: July 25, 2024

Accepted: August 14, 2024

FOR CITATION: Pokhilenko L.N., Korolyuk V.N., Pokhilenko N.P., 2024. Thermobarometry of Depleted Peridotites. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (5), 0780. doi:10.5800/GT-2024-15-5-0780

ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ ДЕПЛЕТИРОВАННЫХ ПЕРИДОТИТОВ

Л.Н. Похиленко¹, В.Н. Королюк¹, Н.П. Похиленко^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведена оценка возможности использования оливиновой термобарометрии для ксенолитов деплетированных перидотитов из трубки Удачной (Якутия), представленных 76 мегакристаллическими дунитами и 5 мегакристаллическими гарцбургитами. По специально разработанной и проверенной методике с помощью микрозондового анализа определены микропримеси Al и Ca в оливинах исследуемых образцов. РТ-параметры ксенолитов мегакристаллических дунитов рассчитаны по уравнениям оливиновых, гранатовых, оливин-гранатовых термобарометров. Для нескольких мегакристаллических гарцбургитов дополнительно использовались энстатитовые геобарометры. Произведенное сравнение полученных данных показало, что наиболее подходящей для оценки РТ-параметров изученной коллекции мегакристаллических дунитов оказывается геотермобарометрическая пара барометр Финнерти-Риджена (Ca в оливине) для перидотитов широкого диапазона РТ и термометр [Bussweiler et al., 2017] (Al в оливине) для гранатовых перидотитов, хотя небольшая часть данных из области высоких РТ (>60 кбар и 1200 °C) вызывает сомнение. Гранатовый барометр [Grütter et al., 2006] (соотношение CaO – Cr₂O₃ в пиропе) не всегда согласуется с оливиновыми геотермометрами. Это может быть связано с необходимостью корректировки уравнений барометра для более широкого спектра составов, а также с возможным нарушением равновесия между гранатом и оливином. Авторы допускают, что более точные результаты могут быть получены при использовании этого барометра в сочетании с гранатовыми термометрами, основанными на определении Ni в гранате. Для серьезных выводов данных по гарцбургитам недостаточно. Однако следует признать, что традиционная пара энстатитового барометра Макгрегора и гранат-оливинового термометра О'Нейл-Вуда пока остается наиболее приемлемой для оценки РТ-параметров мегакристаллических гарцбургитов, хотя и с некоторым занижением температур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геобарометр; геотермометр; оливин; мегакристаллические дуниты; мегакристаллические гарцбургиты; микропримеси; трубка Удачная

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9).

1. ВВЕДЕНИЕ

Термобарометрия пород в целом и представляющих интерес для авторов кратонных мантийных перидотитов в частности является как одной из первостепенных задач в определении условий формирования пород, так и важнейшим инструментом, позволяющим проследить процессы, ответственные за это формирование. Большое количество качественных и удобных, применяемых до сих пор термометров и барометров было создано в 70-х и 80-х годах прошлого века при экспериментальном изучении простых силикатных систем типа MgO – Al₂O₃ – SiO₂ (например [O'Neill, Wood, 1979]), CaO – MgO – Al₂O₃ – SiO₂ (например [Ellis, Green, 1979]), CaO – MgO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂ (например [Finnerty, Boyd, 1987]). Базировались термобарометры либо на равновесии сосуществующих минералов, рассматриваемых как идеальные твердые растворы с известным соотношением активность – состав (компонентный обмен между двумя минералами, например [Harley, 1984]), либо на вхождении какого-то компонента в минерал в определенных количествах при определенных РТ-условиях (мономинеральные термобарометры (например [McGregor, 1974])). Полученные таким образом данные РТ не всегда бесспорны из-за неточности термо-

динамических констант, приближенности расчетных формул, погрешностей аналитики и т.д. [Vaganov, Sokolov, 1988], поэтому применение нескольких термометров и барометров к одной минеральной ассоциации должно увеличивать точность определения РТ формирования этой ассоциации, конечно, лишь в случае равновесия всех ее минералов друг с другом. В условиях верхней мантии равновесные минеральные ассоциации, не затронутые метасоматическими изменениями, наблюдаются не всегда, что нередко создает проблему для однозначного определения РТ-параметров мантийных пород. Не менее проблематичным является отсутствие полной минеральной ассоциации. Так, если для лерцолитов ассоциация представлена оливином, моноклинным и ромбическим пироксенами, гранатом/шпинелью, то в гарцбургитах моноклинного пироксена уже нет, а дуниты состоят из оливина с единичными зернами граната/шпинели (а иногда без них). Такой состав сильно сужает рамки термобарометрии в оценке РТ-параметров деплетированных перидотитов, поэтому в данной работе основное внимание уделено мономинеральной оливиновой термобарометрии, базирующейся на вхождении микропримесей в состав оливина в определенных мантийных обстановках.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Коллекция исследованных образцов из трубки Удачной-Восточной представлена гранатовыми деплетированными перидотитами: 76 мегакристаллическими дунитами (оливин + пироп) и 5 мегакристаллическими гарцбургитами (оливин + пироп + энстатит). Оливин формирует 95 % этих пород, зерна пироба и энстатита единичны (рис. 1).

Минералы деплетированных перидотитов были проанализированы с помощью электронного микронзонда JEOL JXA-8100 (JEOL, г. Токио, Япония) при ускоряющемся напряжении 20 кВ, токе сфокусированного пучка 10 нА и времени счета 20–30 с. Анализ проведен в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Методика анализа детально изложена в работе [Korolyuk et al., 2008]. Определение микропримесей Al и Ca в оливинах было проведено по специальной методике, которая была описана и апробирована в работе [Korolyuk, Pokhilenko, 2016].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы проанализированных гранатов из исследованных мегакристаллических перидотитов показаны на рис. 2. На классификационной диаграмме $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ [Sobolev et al., 1973] они располагаются в дунитовом поле в области высоких значений Cr_2O_3 . В соответствии с минералогическими критериями алмазоносности [Pokhilenko, Sobolev, 1995] такие составы характерны для потенциально алмазоносных пород. Составы оливинов частично приведены в табл. 1.

Первоочередной задачей авторов был расчет РТ-параметров равновесия мегакристаллических дунитов с помощью термометров и барометров, основанных на

корреляции содержаний вышеуказанных микропримесей в оливине с определенными условиями верхней мантии. К одним из наиболее ранних геобарометров такого типа можно отнести геобарометр Финнерти-Риджена для перидотитов широкого диапазона РТ [Finnerty, Rigden, 1981], базирующийся на примеси Са в оливине:

$$P(\text{kbar}) = (-2586 - \text{Ca}(\text{ppmw}) + 3.00T(\text{K}))/23.1.$$

Как видно из представленной формулы, расчетное давление зависит от температуры. К определению температуры, не зависящей от давления, был привлечен геотермометр для гарцбургитов из работы [De Hoog, Gall, 2005], в котором определяемая температура зависит только от количества микропримеси Al в оливине:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 11390 / (12.52 - \ln(\text{ppmAl})) - 273.$$

Далее для рассчитанных давлений была определена температура с помощью двух барозависимых геотермометров для перидотитов из работы [De Hoog et al., 2010]:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (10539 + 79.8 \cdot P) / (15.45 - \ln \text{Ca-OI}) - 273,$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = (11959 + 55.6 \cdot P) / (14.530 - \ln \text{Al-OI}) - 273$$

и геотермометра для гранатовых перидотитов, предложенного в работе [Bussweiler et al., 2017]:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (11245 + 46 \cdot P_{\text{kbar}}) / (13.68 - \ln(\text{Alppm})) - 273$$

(рис. 3, а).

На рис. 3, а, представлены также данные, рассчитанные с помощью базового для дунитов геотермометра [O'Neill, Wood, 1979] по содержанию Fe-Mg-Ca в гранате и Fe-Mg в оливине:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (902 + (\text{XMg-OI} - \text{XFe-OI}) \cdot (498 + 1.51(P - 30)) - 98(\text{XMg-Grt} - \text{XFe-Grt}) + 1347\text{XCa-Grt}) / (\ln(\text{XMg-OI} \cdot \text{XFe-Grt} / \text{XFe-OI} \cdot \text{XMg-Grt}) + 0.357) - 273.$$

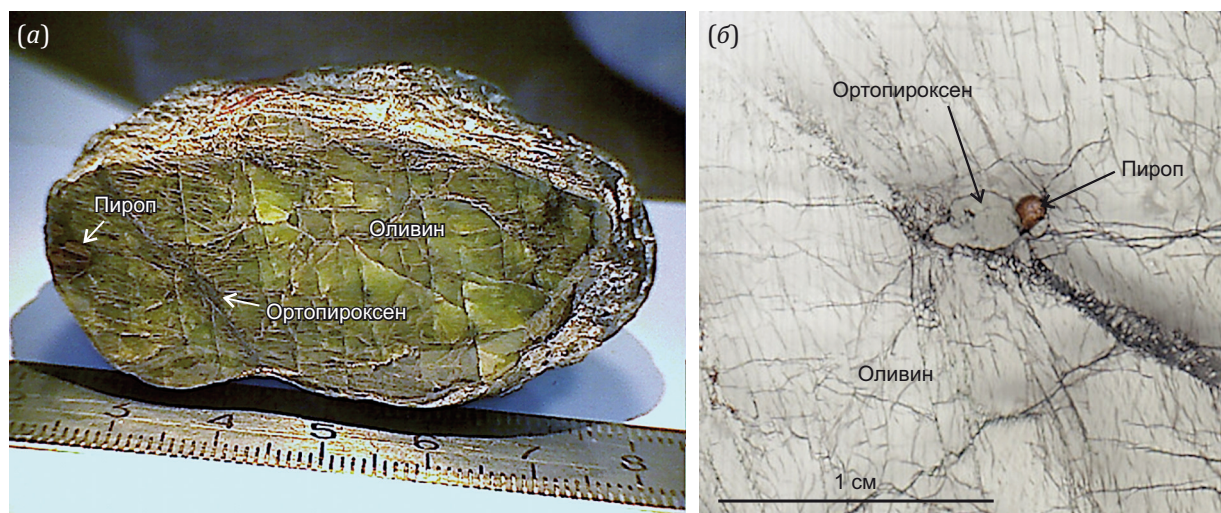


Рис. 1. Мегакристаллический гарцбургит ЛУВ834/09.

(а) – приполированный ксенолит, являющийся монокристаллом слегка растресканного свежего оливина; (б) – фрагмент пластины с отчетливо выделяющимися мелкими зернами ортопироксена и граната.

Fig. 1. Megacrystalline harzburgite LUV834/09.

(а) – polished xenolith, which is a single crystal of slightly fractured fresh olivine; (б) – a slab fragment with clearly visible small grains of orthopyroxene and garnet.

Описанные выше термометры были опробованы в сочетании с геобарометром для гранатовых гарцбургитов африканской трубки Робертс Виктор из работы [Grütter et al., 2006], базирующимся на соотношении $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ в пиропе:

если $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 0.94\text{CaO} + 5$,
то $P \text{ (kbar)} = 26.9 + 3.22 \text{Cr}_2\text{O}_3 - 3.03\text{CaO}$,
или если $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 0.94\text{CaO} + 5$,
то $P \text{ (kbar)} = 9.2 + 36[(\text{Cr}_2\text{O}_3 + 1.6)/(\text{CaO} + 7.02)]$ (рис. 3, б).

Подавляющее большинство точек дунитов, рассчитанных по оливиновым термометрам, образуют на рис. 3, б, размытое облако в высокотемпературной области устойчивости алмаза, пересекая геотерму теплового потока 40 мВт/м². При этом часть точек составов на рис. 3, б, попадает в область стабильности графита.

РТ-параметры равновесия пяти гарцбургитов были оценены как с помощью традиционной пары [McGregor,

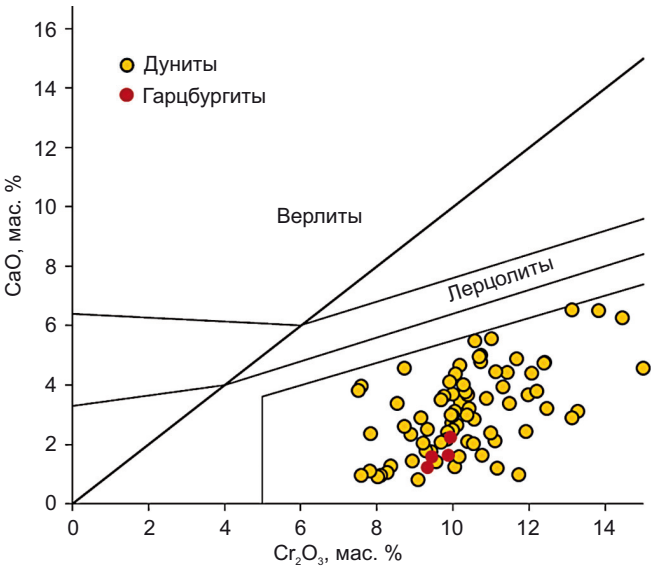


Рис. 2. Составы гранатов мегакристаллических перидотитов на классификационной диаграмме $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$.
Fig. 2. Compositions of garnets of megacrystalline peridotites on the $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ classification diagram.

Таблица 1. Представительные анализы оливинов мегакристаллических перидотитов из трубки Удачной-Восточной
Table 1. Representative analyzes of olivines of megacrystalline peridotites of the Udachnaya-Vostochnaya pipe

Образцы/ окислы	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	Total	Al*	Ca*
ЛУВ 708/11 (д)	41.32	0.05	6.82	0.08	51.66	0.34	100.29	51.9	101.5
ЛУВ 2/09 (д)	41.18	0.04	7.16	0.09	51.29	0.34	100.10	25.9	98.6
ЛУВ 26/10-1 (д)	41.37	0.04	7.22	0.09	51.09	0.38	100.19	49.7	92.2
ЛУВ 70/01 (д)	41.32	0.05	7.12	0.08	51.43	0.39	100.39	47.1	67.9
ЛУВ 850/09 (д)	41.06	0.05	6.92	0.09	51.36	0.35	99.84	51.3	125.8
ЛУВ 517/11 (д)	41.17	0.04	6.71	0.09	51.47	0.34	99.83	32.3	96.5
ЛУВ 588/11 (д)	40.54	0.02	7.31	0.10	50.91	0.37	99.24	32.8	81.5
ЛУВ 71/10 (д)	41.50	0.04	7.21	0.09	51.68	0.36	100.88	34.4	73.6
ЛУВ 371/89 (г)	41.14	0.02	7.09	0.09	50.62	0.34	99.30	н.о.	71.5
ЛУВ 834/09 (г)	40.55	0.04	9.06	0.11	49.41	0.32	99.55	58.2	135.8
ЛУВ 49/10 (г)	41.39	0.04	6.69	0.10	51.54	0.32	100.09	30.2	58.6
ЛУВ 17/91 (г)	41.26	0.03	7.40	0.08	50.81	0.34	99.92	н.о.	50.0

Примечание. Основные окислы даны в мас. %; * – г/т; д – дунит; г – гарцбургит; н.о. – не определялось.
Note. The main oxides are given in wt. %; * – ppm; д – dunite; г – harzburgite; н.о. – undetermined.

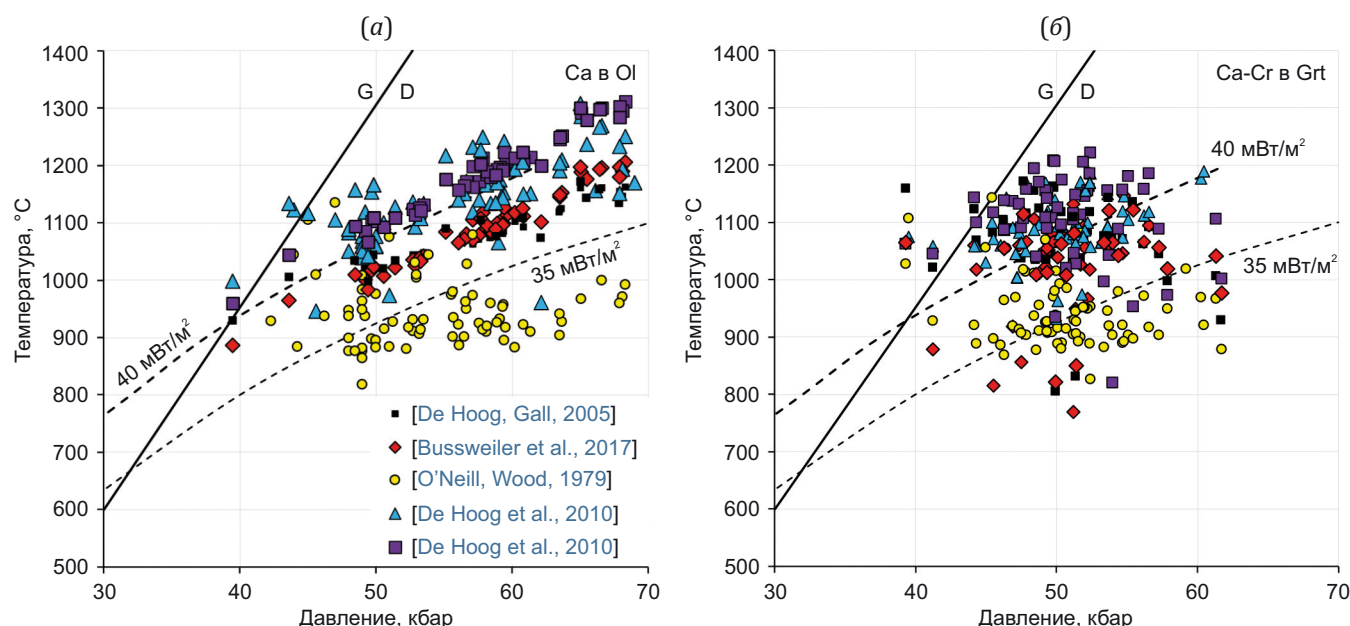


Рис. 3. РТ-параметры деплетированных дунитов из трубки Удачной-Восточной, рассчитанные с помощью барометров. (а) – [Finnerty, Rigden, 1981]; (б) – [Grütter et al., 2006]. И использованные термометры указаны в легенде. Нанесена линия перехода графит (G) – алмаз (D) [Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976] и геотермы теплового потока 40 и 35 мВт/м² [Pollack, Chapman, 1977]. Пояснения см в тексте.

Fig. 3. PT-parameters (pressure (kbar, abscissa), temperature (°C, ordinate) of depleted dunites from the Udachnaya-Vostochnaya pipe, calculated with the help of barometers.

(а) – [Finnerty, Rigden, 1981]; (б) – [Grütter et al., 2006]. Thermometers used are indicated in the legend. Curves have been plotted for graphite (G) to diamond (D) transition [Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976] and 40 mW/m² and 35 mW/m² geothermal heat flow [Pollack, Chapman, 1977]. See text for explanations.

1974; O'Neill, Wood, 1979] (рис. 4, а), так и указанными выше (для дунитов) геотермобарометрами, а также с использованием этих геотермобарометров наряду с энстатитовым геобарометром [Finnerty, Boyd, 1987] (рис. 4, б–г). Для трех гарцбургитов температура была оценена также по геотермометру [Harley, 1984], базирующемуся на Fe-Mg распределении между гранатом и ортопироксеном:

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = (3740 + 1400 \cdot (\text{Ca-Grt}/(\text{Ca} + \text{Mn} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mg})) + 22.86 \cdot P) / (R \cdot \ln((\text{Fe}/\text{Mg})\text{-Grt}/(\text{Fe}/\text{Mg})\text{-Opx}) + 1.96) - 273.$$

На рис. 4, а, черными кружками для сравнения нанесены данные по гарцбургитам из работы [Pokhilenko et al., 1993], в которой отмечалось, что точки мегакристаллических гарцбургитов лежат ниже геотермы теплового потока 40 мВт/м².

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 3, а, термометры, основанные на определении микропримесей Al и Ca в оливине, хорошо сочетаются с барометром, базирующимся на содержании Ca в оливине. Однако, если точки дунитов, рассчитанные по термометрам из работы [De Hoog et al., 2010], располагаются вдоль геотермы теплового потока 40 мВт/м², то данные для тех же образцов, посчитанные с помощью термометров [De Hoog, Gall, 2005; Bussweiler et al., 2017], демонстрируют температуру ниже на 100° и полностью лежат в области стабиль-

ности алмаза, оправдывая ожидания, основанные на составе гранатов из этих образцов (см. рис. 2). Точки дунитов, рассчитанные по термометру [O'Neill, Wood, 1979], формируют облако, большей частью лежащее в районе и ниже геотермы теплового потока 35 мВт/м², и тоже располагаются в области стабильности алмаза. Однако необходимо заметить, что группа значений выходит за рабочие рамки термометров для [Bussweiler et al., 2017]: T (°C) 1000–1300, P (кбар) 28–60; для [O'Neill, Wood, 1979] T (°C) 900–1400, P (кбар) 30–60.

Точки РТ-оценок дунитов по разным термометрам в сочетании с барометром [Grütter et al., 2006] на рис. 3, б, не образуют трендов вдоль геотерм теплового потока. Бесформенное облако данных, скорее всего, свидетельствует о плохой сочетаемости данного барометра с мономинеральными оливиновыми термометрами.

Точки составов дунитов, посчитанные по термометру [O'Neill, Wood, 1979], занимают на обоих графиках очень близкий температурный диапазон в районе геотермы теплового потока 35 мВт/м² (см. рис. 3, а, б).

Оценки РТ параметров гарцбургитов показывают широкий диапазон давлений (42–68 кбар) для определений по [McGregor, 1974] (рис. 4, а), и узкий (48–53 кбар) при расчетах по [Grütter et al., 2006] (рис. 4, в) и [Finnerty, Boyd, 1987] (рис. 4, г). Расчет давления для одного из трех гарцбургитов по [Finnerty, Rigden, 1981] (рис. 4, б) демонстрирует явно завышенную оценку (70 кбар).

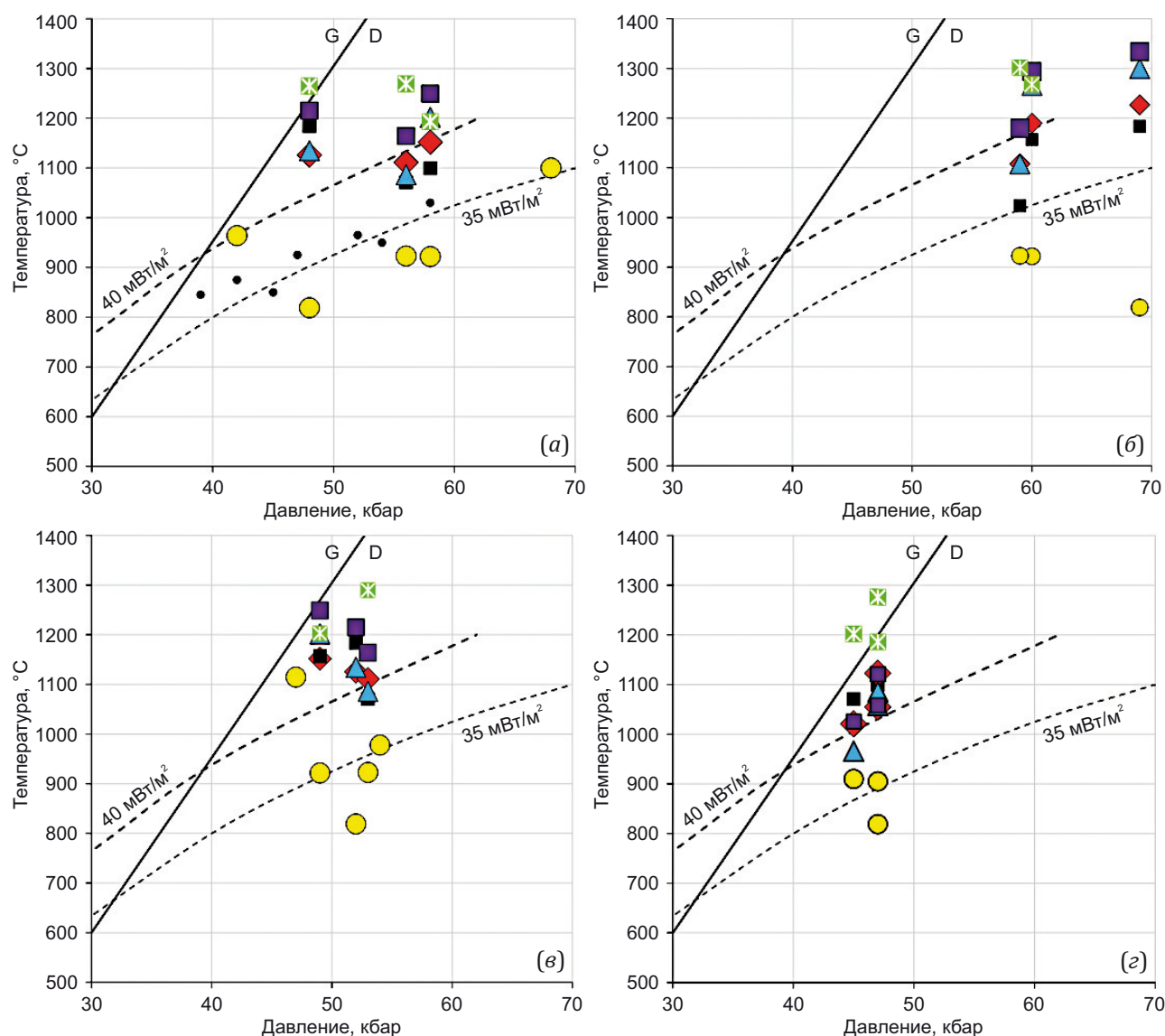


Рис. 4. РТ-параметры деплетированных гарцбургитов из трубки Удачной-Восточной, рассчитанные с помощью барометров. (а) – по [McGregor, 1974]; (б) – по [Finnerty, Rigden, 1981]; (е) – по [Grütter et al., 2006]; (з) – по [Finnerty, Boyd, 1987]. Использованные термометры указаны в легенде к рис. 3; зеленые квадраты – температура по [Harley, 1984]. Нанесена линия перехода графит (G) – алмаз (D) [Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976] и геотермы теплового потока 40 и 35 мВт/м² [Pollack, Chapman, 1977]. Точки гарцбургитов из работы [Pokhilenko et al., 1993] показаны черными кружками. Пояснения см в тексте.

Fig. 4. PT-parameters (pressure (kbar, abscissa), temperature (°C, ordinate)) of depleted harzburgites from the Udachnaya-Vostochnaya pipe, calculated with the help of barometers.

(a) – [McGregor, 1974]; (b) – [Finnerty, Rigden, 1981]; (e) – [Grütter et al., 2006]; (z) – [Finnerty, Boyd, 1987]. The thermometers used are indicated in the legend to Fig. 3; green squares stand for temperature according to [Harley, 1984]. Curves have been plotted for graphite (G) to diamond (D) transition [Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976] and 40 mW/m² and 35 mW/m² geothermal heat flow [Pollack, Chapman, 1977]. Harzburgite points from [Pokhilenko et al., 1993] are shown in black circles. See text for explanation.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки давления одних и тех же деплетированных перидотитов по мономинеральным барометрам не совпадают.

Для оценки РТ-параметров последнего равновесия мегакристаллических дунитов, представленных по большей части оливином, наиболее подходящей, по мнению авторов, оказывается геотермобарометрическая пара барометр Финнерти-Риджена (Са в оливине) для перидотитов широкого диапазона РТ [Finnerty,

Rigden, 1981] – термометр Бусвейлера с соавторами (Al в оливине) для гранатовых перидотитов [Bussweiler et al., 2017], хотя небольшая часть данных из области высоких РТ (>60 кбар и 1200 °C) вызывает сомнение.

Термобарометр Грюттера с соавторами, основанный на соотношении CaO – Cr₂O₃ в пиропе и созданный для гранатовых гарцбургитов африканской трубки Робертс Виктор [Grütter et al., 2006], не всегда согласуется с оливиновыми геотермометрами. Причин может быть несколько: 1) необходимость корректировки

уравнений барометра для более широкого компонентного спектра составов; 2) нарушение равновесия между гранатом и оливином; 3) предпочтение в использовании этого барометра в сочетании с гранатовыми термометрами (базирующимися на определении содержания Ni в гранате) и т.д.

Выборка гарцбургитов слишком мала, поэтому данных недостаточно для серьезных выводов. Однако следует признать, что традиционная пара [MacGregor, 1974; O'Neill, Wood, 1979] пока остается наиболее приемлемой для оценки РТ-параметров мегакристаллических гарцбургитов с учетом некоторого занижения температур.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарны редакции и рецензентам за ценные советы и замечания, позволившие существенно улучшить статью.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bussweiler Y., Brey G.P., Pearson D.G., Stachel T., Stern R.A., Hardman M.F., Kjarsgaard B.A., Jackson S.E., 2017. The Aluminum-in-Olivine Thermometer for Mantle Peridotites – Experimental versus Empirical Calibration and Potential Applications. *Lithos* 272–273, 301–314. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.12.015>.

De Hoog J.C.M., Gall L., 2005. Trace Element Geochemistry of Mantle Olivine and Its Application to Geothermometry. *Ophiolite* 30 (2), 182–183.

De Hoog J.C.M., Gall L., Cornell D.H., 2010. Trace-Element Geochemistry of Mantle Olivine and Application to Mantle Petrogenesis and Geothermobarometry. *Chemical Geology* 270 (1–4), 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017>.

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>.

Finnerty A.A., Boyd F.R., 1987. Thermobarometry for Garnet Peridotites: Basis for the Determination of Thermal and Compositional Structure of the Upper Mantle. In:

P.H. Nixon (Ed.), *Mantle Xenoliths*. Wiley-Interscience, New York, p. 381–402.

Finnerty A.A., Rigden S.M., 1981. Olivine Barometry Application to Pressure Estimation for Terrestrial and Lunar Rocks. *Lunar and Planetary Science XII*, 279–281.

Grütter H.S., Latti D., Menzies A., 2006. Cr-Saturation Arrays in Concentrate Garnet Compositions from Kimberlite and Their Use in Mantle Barometry. *Journal of Petrology* 47 (4), 801–820. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi096>.

Harley S.L., 1984. An Experimental Study of the Partitioning of Fe and Mg between Garnet and Orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 359–373. <https://doi.org/10.1007/BF01187140>.

Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976. The Equilibrium Boundary Between Graphite and Diamond. *Journal of Geophysical Research* 81 (14), 2467–2470. <https://doi.org/10.1029/JB081i014p02467>.

Korolyuk V.N., Lavrent'ev Y.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N., 2008. JXA-8100 Microanalyzer: Accuracy of Analysis of Rock-Forming Minerals. *Russian Geology and Geophysics* 49 (3), 165–168. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.07.005>.

Korolyuk V.N., Pokhilenko L.N., 2016. Electron Probe Determination of Trace Elements in Olivine: Thermometry of Depleted Peridotites. *Russian Geology and Geophysics* 57 (12), 1750–1758. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.011>.

McGregor I.D., 1974. The System MgO-SiO₂-Al₂O₃: Solubility of Al₂O₃ in Enstatite for Spinel and Garnet Peridotite Compositions. *American Mineralogist* 59, 110–119.

O'Neill H.S.C., Wood B.J., 1979. An Experimental Study of Fe-Mg Partitioning between Garnet and Olivine and Its Calibration as a Geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70, 59–70. <https://doi.org/10.1007/BF00371872>.

Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., 1995. Mineralogical Criteria for Kimberlite Diamond Grade. In: Sobolev N.V., Zuev V.M., Pokhilenko N.P., Zinchuk N.N. (Eds), *Kimberlites of Yakutia. Field Guide Book*. Sixth International Kimberlite Conference. Novosibirsk, p. 79–81.

Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Boyd F.R., Pearson D.G., Shimizu N., 1993. Megacrystalline Pyrope Peridotites in the Lithosphere of the Siberian Platform: Mineralogy, Geochemical Peculiarities and the Problem of Their Origin. *Russian Geology and Geophysics* 34 (1), 71–84.

Pollack H.N., Chapman D.S., 1977. On the Regional Variation of Heat Flow, Geotherms and Lithospheric Thickness. *Tectonophysics* 38 (3–4), 279–296. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90215-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90215-3).

Sobolev N.V., Lavrent'ev Yu.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V., 1973. Chrome-Rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and Their Parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 40, 39–52. <https://doi.org/10.1007/BF00371762>.

Vaganov V.I., Sokolov S.V., 1988. Thermobarometry of Ultrabasic Parageneses. Nedra, Moscow, 149 p. (in Russian) [Ваганов В.И., Соколов С.В. Термобарометрия ультраосновных парагенезисов. М.: Недра, 1988. 149 с.].