

УДК 551.14:552.163

## Р-Т ТРЕНДЫ ОСТЫВАНИЯ И МЕТАМОРФИЗМ В УСЛОВИЯХ НИЗОВ АМФИБОЛИТОВОЙ ФАЦИИ В КСЕНОЛИТАХ ГРАНУЛИТОВ СИБИРСКОГО КРАТОНА

© 2024 г. В. М. Григорьева<sup>1</sup>, А. Л. Перчук<sup>1,2</sup>, академик В. С. Шацкий<sup>3</sup>, Н. Г. Зиновьева<sup>1</sup>

Поступило 04.09.2023 г.

После доработки 29.09.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

Приводятся результаты детальных петрологических исследований мафических гранулитов из кимберлитовых трубок Юбилейная (Алакит-Мархинское поле) и Новинка (Верхне-Мунское поле), в которых с помощью минеральной геотермобарометрии впервые восстановлены регрессивные тренды метаморфизма, отражающие субизобарический переход пород из низов гранулитовой фации в низы амфиболитовой фации в среднекоровых условиях. Установлено, что составы граната, клино- и ортопироксена зависят от контактирующего минерала, что отражает разные температуры закрытия обменных минеральных реакций. Наиболее высокие температуры устанавливаются с помощью дупироксенового термометра, более низкие – по гранат-клинопироксеновому и гранат-ортопироксеновому термометрам. Моделирование фазовых равновесий показало термодинамические условия низов амфиболитовой фации: 540 °С, 0.76 ГПа,  $\lg f_{O_2} = QFM + 1.7$  (трубка Юбилейная); 530 °С, 0.72 ГПа,  $\lg f_{O_2} = QFM + 2.2$  (трубка Новинка). Стабильность гранулитового парагенезиса гранат+клинопироксен+ортопироксен+плаггиоклаз при таких Р-Т условиях – малоизвестное явление, отражающее дефицит водного флюида при кристаллизации габброидов и их последующем остывании в глубинных участках кратонов.

*Ключевые слова:* континентальная кора, коровые ксенолиты, гранулиты, РТ тренд метаморфизма, моделирование фазовых равновесий

DOI: 10.31857/S2686739724010123

### ВВЕДЕНИЕ

Гранулиты являются своеобразной визитной карточкой докембрийской континентальной коры. Различают два основных типа этих пород – гранулиты комплексов регионального метаморфизма, находящихся между кратонами, и гранулиты из ксенолитов в кимберлитах, выносимые на поверхность из нижней и средней континентальной коры [1]. В мировой литературе доминируют публикации, посвященные первому типу гранулитов – более доступным и отличающимся разнообразием литологических типов, Р-Т условий образования и эволюции [2]. Геологическое положение таких гранулитов подразумевает, что эти породы не участвовали в формировании континентальной

коры, только в ее преобразовании. Это означает, что для решения проблемы образования коры более важны гранулиты второго типа [3].

Надо отметить, что количество детальных петрологических исследований коровых ксенолитов невелико. В этих работах для восстановления Р-Т условий образования пород обычно используется метод классической геотермобарометрии [4–6]. При этом передовой для современной метаморфической петрологии метод моделирования фазовых равновесий к коровым гранулитам применяется исключительно редко [7].

По литературным данным (например, [6]), для коровых ксенолитов характерно сохранение записи лишь о конкретных Р-Т условиях, что заметно отличает их от гранулитов метаморфических комплексов, часто демонстрирующих Р-Т тренды эволюции метаморфизма. В данной работе на примере мафических гранулитов из трубок Юбилейная и Новинка, расположенных в Алакит-Мархинском и Верхне-Мунском кимберлитовых полях Сибирского кратона соответственно, впервые приводятся

<sup>1</sup>Кафедра петрологии и вулканологии, Геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Московская область, Россия

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск

петрологические свидетельства регрессивной Р-Т эволюции данных пород вплоть до исключительно низких для них температур.

## ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

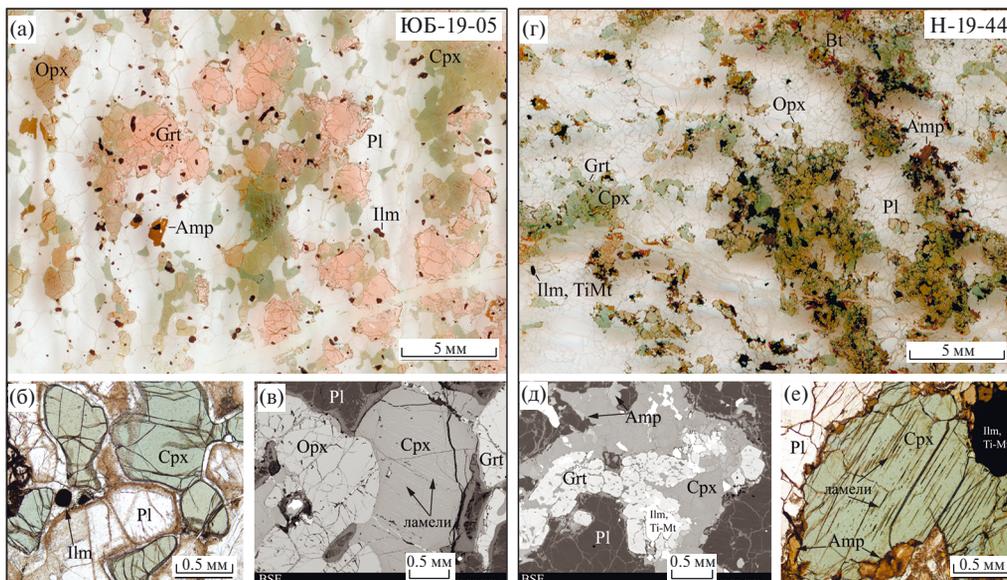
Мафические гранулиты из трубок Юбилейная (образец ЮБ-19-05) и Новинка (образец Н-19-44) имеют массивную текстуру со слабо выраженной гнейсовидностью. Структура пород гетеробластовая, среднемелкозернистая, гранобластовая (обр. ЮБ-19-05) и лепидогранобластовая (обр. Н-19-44). Гранулиты состоят из плагиоклаза (Pl), клинопироксена (Cpx), граната (Grt) и ортопироксена (Opx) в различных пропорциях (рис. 1 а, г): в ЮБ-19-05 – Pl 55%, Grt 20%, Cpx 15%, Opx 10%; в Н-19-44 – Pl 65%, Cpx 15%, Opx 10%, Grt 10%. В акцессорных количествах в обеих породах присутствуют ильменит (Ilm), рутил (Rt) и апатит, в образце ЮБ-19-05 – амфибол (Amp), а в Н-19-44 – кварц (Q). В гранулите Н-19-44 среди акцессорных минералов также отмечены магнетит, титаномагнетит, циркон и шриланкит, регрессивными минералами являются амфибол и биотит (Bt). По жилам и краям зерен в породах развиваются вторичные хлорит и калиевый полевой шпат, связанные, вероятно, с воздействием кимберлитового расплава (рис. 1 б).

Химический состав минералов определялся при помощи электронно-зондового

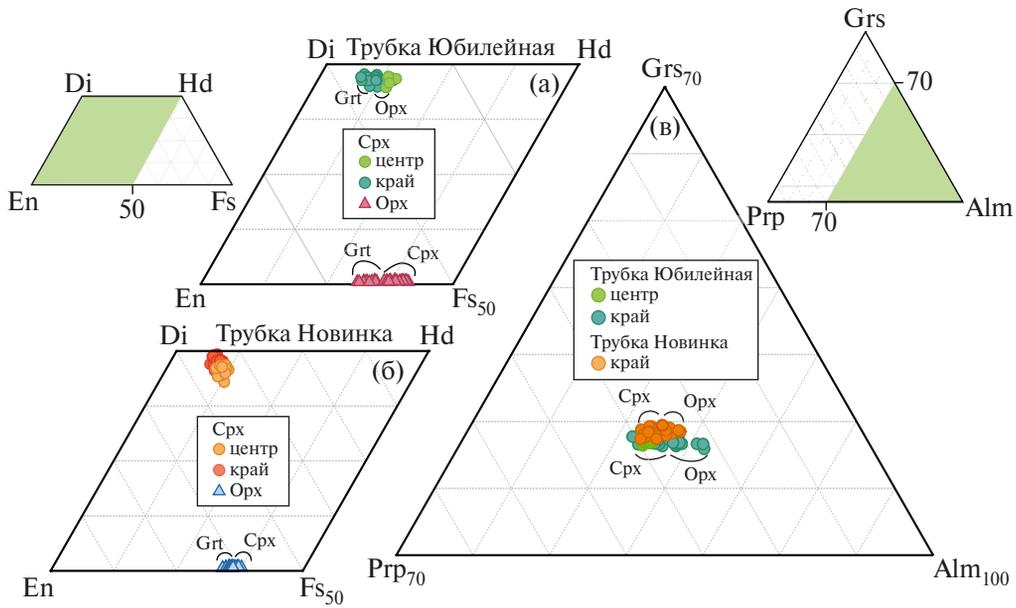
микроанализатора Superprobe “JEOL” JXA-8230 в режиме сфокусированного электронного пучка при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока 30 нА. При анализе главных элементов время накопления импульсов на пике составляло – 20 сек, на фоне – 10 сек. В качестве стандартов использовались природные и синтетические минералы.

Клинопироксены являются авгитами и имеют состав  $En_{6-9}, Fs_{1-3}, Di_{53-65}, Hd_{14-20}, Jd_{1-6}, Aeg_{6-13}, CaTs_{5-9}$  (обр. ЮБ-19-05) и  $En_{2-7}, Fs_{1-3}, Di_{67-76}, Hd_{13-18}, Jd_{1-5}, Aeg_{1-6}, CaTs_{1-6}, Ess_{3-9}$  (обр. Н-19-44). В ядрах зерен наблюдаются ламели ортопироксена и ильменита (рис. 1 в, е), что может указывать на магматическое происхождение ядер [7]. От центра к краю в клинопироксенах повышается магнезиальность и снижается содержание алюминия. В образце ЮБ-19-05 в краевых частях зерен состав изменяется в зависимости от контактирующего минерала (рис. 2 а, табл. 1):  $[X_{Mg} = 0.75-0.78; Al = 0.17-0.22 \text{ ф.е.}]$  на границе с ортопироксеном и  $[X_{Mg} = 0.81-0.85, Al = 0.13-0.17 \text{ ф.е.}]$  на границе с гранатом. В образце Н-19-44 состав практически не зависит от минерала на контакте (рис. 2 б, табл. 1).

Гранаты в обоих образцах имеют близкий состав –  $Alm_{52-58}, Prp_{24-30}, Grs_{16-18}$  (ЮБ-19-05) и  $Alm_{53-58}, Prp_{24-29}, Grs_{17-19}$ . (Н-19-44) и более



**Рис. 1.** Петрографические и микроструктурные особенности ксенолитов гранулитов: (а–в) – трубка Юбилейная (обр. ЮБ-19-05); (г–е) – Новинка (обр. Н-19-44). а) скан поверхности шлифа; б) оптическое изображение участка шлифа; в) ламели распада в клинопироксене на изображении в обратно-рассеянных (BSE) электронах; г) скан поверхности шлифа; д) каймы граната на границе клинопироксена и плагиоклаза на изображении в обратно-рассеянных электронах; е) ламели распада в клинопироксене, оптическое изображение.



**Рис. 2.** а) составы клино- (Срх) и ортопироксенов (Орх) в образце из трубки Юбилейная (ЮБ-19-05) на фрагменте трапеции Di-Hd-En-Fs; б) составы Срх и Орх в образце Н-19-44 на фрагменте трапеции Di-Hd-En-Fs; в) составы гранатов (Grt) образцов ЮБ-19-05 и Н-19-44 на фрагменте тройной диаграммы Grs-Prp-Alm. Более магнезиальные составы Срх соответствуют зонам контакта с Grt, более железистые – с Орх; аналогичные различия составов краевых частей зерен в зависимости от контактирующего минерала фиксируются для Орх и Grt.

высокую магнезиальность на границе с клинопироксеном, чем ортопироксеном (рис. 2 в, табл. 1).

Ортопироксены в образце ЮБ-19-05 являются энстатитами, на контакте с гранатом и клинопироксеном их составы различаются (табл. 1).

Плагиоклаз азонален, в образце ЮБ-19-05 соответствует олигоклазу  $Ab_{65-69}, An_{27-30}, Kfs_{2-6}$ , в образце Н-19-44 – андезину  $Ab_{59-64}, An_{34-39}, Kfs_{2-4}$ .

Амфибол в гранулитах по составу соответствует паргаситу. В образце ЮБ-19-05 он в равновесии с другими минералами, в гранулите Н-19-44 является наложенным.

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ P-T УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА

Для восстановления P-T условий метаморфизма гранулитов применялся метод моделирования фазовых равновесий с помощью программы *Perple\_X* (версия 6.9.1). Использовалась база термодинамических данных *hp633ver.dat* [8] и следующие модели твердых растворов: гранат –  $Gt(HGP)$ ,

клино- и ортопироксен –  $Cpx(HGP)$  и  $Opx(HGP)$ , оливин –  $O(HGP)$ , шпинель –  $Sp(HGP)$ , расплав –  $melt(HGP)$  [9], плагиоклаз –  $feldspar$  [10], амфибол –  $cAmph(G)$  [11].

Так как образцы подвержены вторичным изменениям, для построения фазовых диаграмм использовались их эффективные составы, рассчитанные на основе модальных содержаний минералов на представительных участках BSE-панорам шлифов, средних значений составов минералов и их плотности. При расчете эффективного состава исключались ядра клинопироксенов, которые полагаются магматическими [7]. Скорректированные модальные содержания минералов в образце ЮБ-19-05: Pl = 62.1%; Grt = 19.9%; Cpx 9.4%; Opx 6.5%; Plm 1.1%, в образце Н-19-44: Pl 64.9%, Cpx 15.1%, Opx 10.2%, Grt 7.3%, Plm 2.5%.

При моделировании учитывалось количество  $O_2$  в системе в связи со значительным содержанием  $Fe^{3+}$  в клинопироксенах. Содержание  $O_2$  производилось по методике, изложенной в работе [7]. Для этого рассчитывались  $T-fO_2$  диаграммы при постоянном давлении в диапазоне от 6 до 10 кбар. На них выносились изоплеты

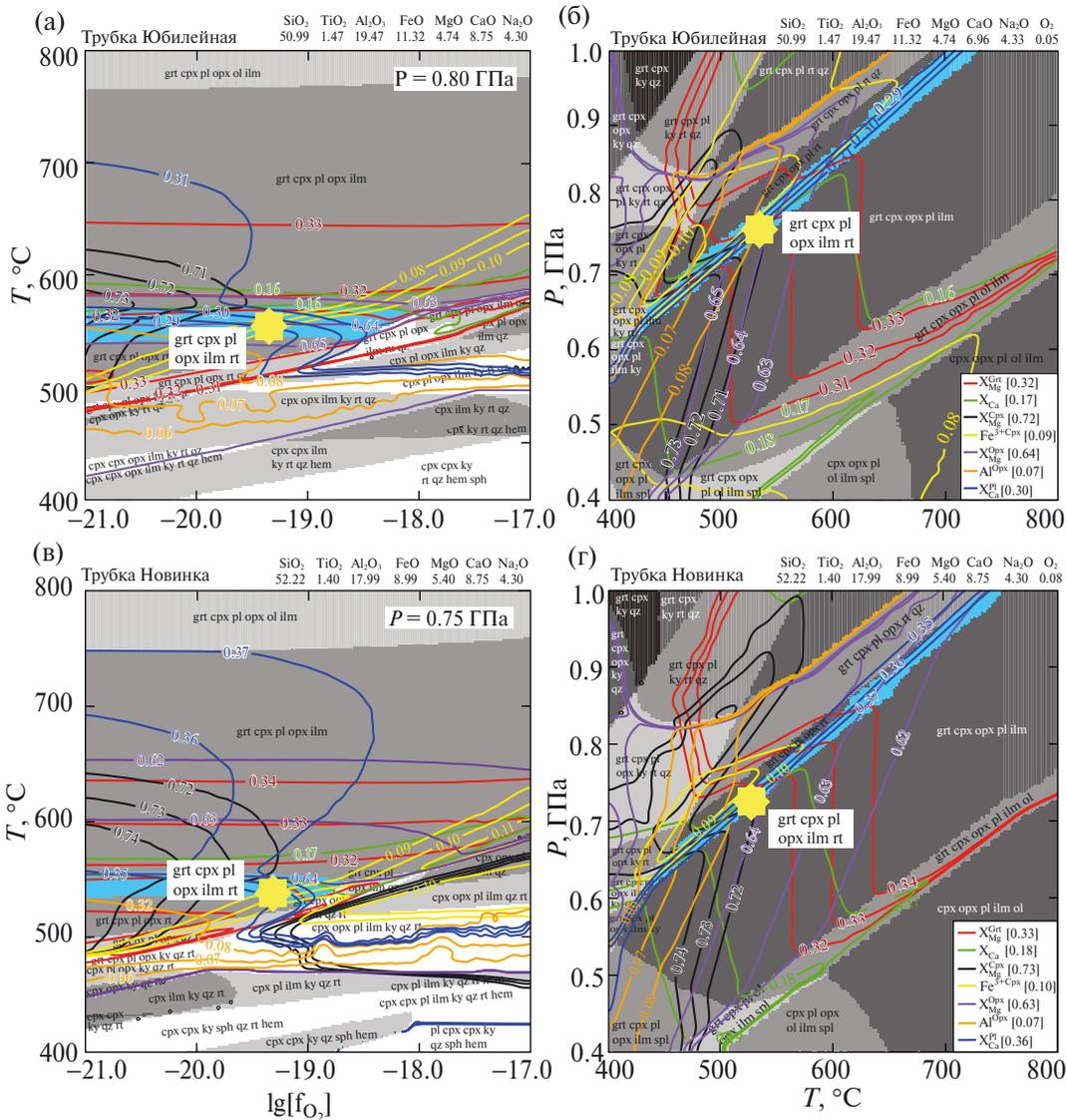
**Таблица 1.** Представительные микронзондовые анализы (масс. %), усредненные составы и кристаллохимические формулы минералов из ксенолитов гранулитов в трубках Юбилейная (ЮБ-19-05) и Новинка (Н-19-44).

Компоненты	Клинопироксен						Ортопироксен									
	ЮБ-19-05			Н-19-44			ЮБ-19-05			Н-19-44						
	ц.	к. с Оpx	к. с Grt	сп.	ц.	к. с Оpx	к. с Grt	сп.	ц.	к. с Сpx	к. с Grt	сп.				
SiO <sub>2</sub>	51.60	51.81	52.30	51.94	49.07	51.53	51.80	51.83	51.41	51.25	52.61	51.92	51.86	51.68	51.71	51.43
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.36	0.31	0.35	0.19	0.21	0.19	0.21	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.47	4.18	3.15	3.74	3.51	2.91	2.72	3.06	2.30	2.10	1.12	1.55	1.88	1.54	1.56	1.62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
FeO	9.32	8.98	8.31	8.62	9.72	8.42	8.45	9.04	24.05	24.49	21.78	22.99	23.35	23.40	22.85	23.50
MnO	0.14	0.13	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11	0.14	0.34	0.33	0.24	0.28	0.28	0.29	0.29	0.31
MgO	11.92	12.23	13.26	12.71	12.91	13.66	13.87	13.16	20.99	21.23	23.57	22.31	22.08	21.83	22.17	21.72
CaO	20.54	20.59	20.93	20.82	21.34	22.54	22.43	22.03	0.37	0.32	0.29	0.33	0.43	0.40	0.35	0.40
Na <sub>2</sub> O	1.66	1.72	1.52	1.62	0.91	0.71	0.70	0.78	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
Сумма	100.16	100.05	99.91	99.94	97.80	100.11	100.29	100.26	99.54	99.86	99.69	99.47	99.93	99.20	99.02	99.05
O								6								
Si	1.91	1.91	1.93	1.92	1.86	1.91	1.91	1.92	1.93	1.95	1.94	1.95	1.93	1.95	1.94	1.95
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.19	0.18	0.14	0.16	0.16	0.13	0.12	0.13	0.08	0.06	0.08	0.06	0.08	0.06	0.08	0.06
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.21	0.18	0.16	0.17	0.13	0.16	0.16	0.21	0.71	0.64	0.68	0.66	0.71	0.64	0.68	0.66
Fe <sup>3+</sup>	0.08	0.09	0.10	0.10	0.17	0.10	0.10	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.66	0.67	0.73	0.70	0.73	0.75	0.76	0.73	1.20	1.28	1.23	1.27	1.20	1.28	1.23	1.27
Ca	0.81	0.82	0.83	0.82	0.87	0.89	0.89	0.87	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.12	0.12	0.11	0.12	0.07	0.05	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ катионов	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Окончание таблицы 1

Компоненты	Гранат						Плагиоклаз				Амфибол		Биотит		
	ЮБ-19-05			Н-19-44			ЮБ-19-05		Н-19-44		ЮБ-19-05	Н-19-44	Н-19-44		
	ц.	к. с Орх	к. с Срх	сп.	ц.	к. с Орх	к. с Срх	сп.	Pl, к.	сп.	к.	к.	к.		
SiO <sub>2</sub>	38.96	38.24	38.71	38.75	39.34	38.21	38.75	38.59	61.14	60.39	58.18	58.24	41.97	41.61	36.61
TiO <sub>2</sub>	0.12	0.05	0.05	0.08	0.01	0.08	0.05	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	2.09	1.52	4.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.64	21.43	21.42	21.51	22.21	21.98	21.94	21.95	24.79	24.88	25.94	25.88	12.79	12.64	14.81
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.04
FeO	25.32	27.28	25.50	25.79	24.76	25.39	25.18	25.14	0.06	0.06	0.13	0.18	12.45	14.79	14.41
MnO	1.01	1.11	1.00	1.04	1.01	1.20	1.02	1.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07	0.08	0.03
MgO	7.31	6.05	7.07	6.91	6.67	6.38	6.80	6.80	0.01	0.02	0.00	0.01	12.01	11.57	14.47
CaO	6.16	5.92	6.16	6.08	6.55	6.60	6.46	6.48	6.05	6.10	7.59	7.44	11.32	11.91	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.03	0.03	8.13	7.96	7.23	7.21	1.86	1.26	0.25
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.46	0.61	0.41	0.53	2.50	1.62	9.72
Сумма	100.57	100.12	99.93	100.21	100.63	99.87	100.24	100.09	100.69	100.02	99.50	99.49	97.09	97.01	94.88
O				12					8				23		11
Si	2.99	2.98	3.00	3.00	3.01	2.97	2.99	2.98	2.70	2.69	2.62	2.62	6.13	6.09	2.79
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.17	0.25
Al	1.96	1.97	1.95	1.96	2.02	2.01	1.99	2.00	1.29	1.31	1.38	1.37	2.20	2.17	1.33
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	1.59	1.71	1.61	1.63	1.59	1.60	1.60	1.59	0.00	0.00	0.00	0.01	0.38	0.44	0.66
Fe <sup>3+</sup>	0.04	0.07	0.05	0.04	0.00	0.05	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	1.37	0.25
Mn	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Mg	0.84	0.70	0.82	0.80	0.76	0.74	0.78	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	2.61	2.52	1.67
Ca	0.51	0.49	0.51	0.50	0.54	0.55	0.53	0.54	0.29	0.29	0.37	0.36	1.77	1.87	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.70	0.69	0.63	0.63	0.53	0.35	0.04
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.03	0.47	0.30	0.91
Σ катионов	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	5.01	5.02	5.02	5.02	15.47	15.29	7.90

ц. – центр; к. – контакт с другим минералом; ср. – усредненный состав, использованный для расчета эффективного состава породы.

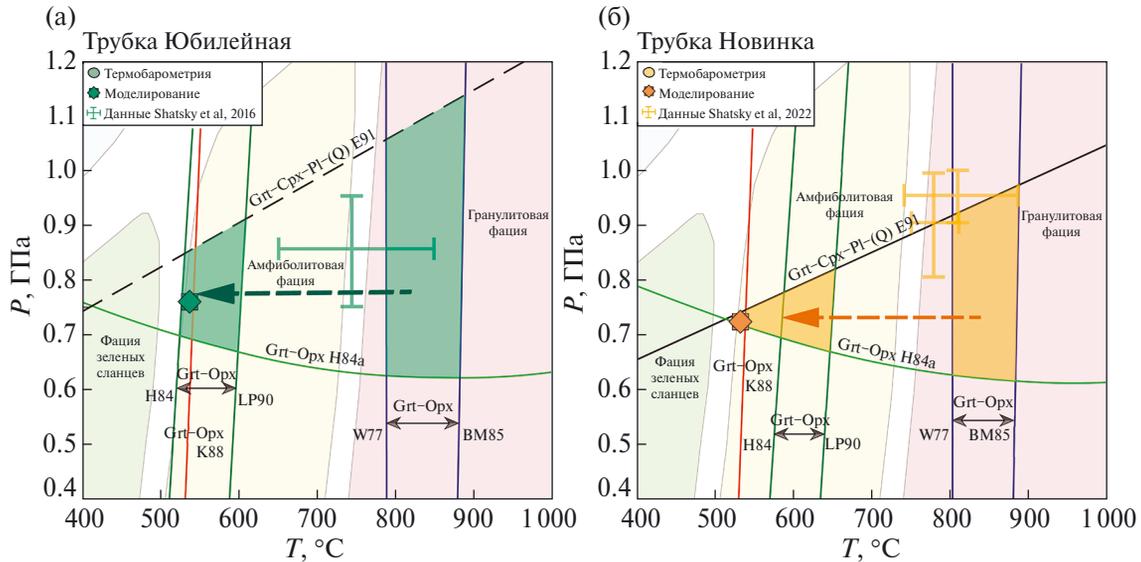


**Рис. 3.** Фазовые P-T и T-fO<sub>2</sub> диаграммы для гранулитов из трубок Юбилейная (ЮБ-19-05) и Новинка (Н-19-44), рассчитанные с помощью Perple\_X. а) T-fO<sub>2</sub> диаграммы при 0.8 ГПа для образца ЮБ-19-05; б) P-T диаграмма для образца ЮБ-19-05; в) T-fO<sub>2</sub> диаграммы при 0.75 ГПа для образца Н-19-44; г) P-T диаграмма для образца Н-19-44. Голубым цветом показано поле парагенезиса породы. Желтой звездой отмечено пересечение изоплет, отвечающих составам минералов породы (указаны в правом нижнем углу P-T-диаграмм). Эффективные составы указаны над диаграммами. Изоплеты: X<sub>Mg</sub><sup>Grt</sup> = Mg/(Mg+Fe<sup>tot</sup>); X<sub>Ca</sub><sup>Grt</sup> = Ca/(Ca+Mg+Fe<sup>tot</sup>); X<sub>Mg</sub><sup>Cpx</sup> = Mg/(Mg+Fe<sup>tot</sup>); Fe<sup>3+</sup>/Cpx = Fe<sup>3+</sup> (ф.е.); X<sub>Mg</sub><sup>Opx</sup> = Mg/(Mg+Fe<sup>tot</sup>); Al<sup>Opx</sup> = Al (ф.е.); X<sub>Ca</sub><sup>Pl</sup> = Ca/(Ca+Na).

с параметрами составов породообразующих минералов, по пересечению которых устанавливалось давление и фугитивность кислорода. Для восстановления P-T-fO<sub>2</sub> условий определялось содержание O<sub>2</sub> в системе, с использованием которого рассчитывалась итоговая фазовая P-T диаграмма.

T-fO<sub>2</sub> диаграмма для равновесного состава породы ЮБ-19-05 при 0.8 ГПа представлена на

рис. 3 а. Только при этом давлении удалось получить пересечение изоплет в поле парагенезиса гранулита, соответствующие параметры составили T = 550° и fO<sub>2</sub> = -19.4 при 0.05 мас.% O<sub>2</sub> в системе. На P-T диаграмме при данном количестве O<sub>2</sub> (рис. 3 б) пересечение изоплет определяет условия формирования породы – 540 °C и 0.76 ГПа, что соответствует низам амфиболитовой фации метаморфизма (рис. 3 а).



**Рис. 4.** P-T условия образования гранулитов из трубок Юбилейная (ЮБ-19-05) (а) и Новинка (Н-19-44) (б) методами геотермобарометрии и моделирования фазовых равновесий. Используемые минеральные равновесия: Grt–Сrx– (красная линия), Grt–Орх– (зеленые линии), Сrx–Орх– (синие линии) геотермометры и Grt–Орх– (светло-зеленая линия), Grt–Сrx–Pl–Q– (черные линии) барометры для средних составов краевых частей минералов. Зеленым и желтым выделены поля установленных P-T условий. Стрелки – предполагаемые P-T тренды метаморфизма. K88 – Krogh (1988); E91 – Eckert, et al. (1991); W77 – Wells (1977); BM85 – Bertrand, Mercier (1985); H84 – Harley (1984); H84a – Harley (1984); LP90 – Лаврентьева, Перчук (1990).

На  $T-f_{O_2}$  диаграмме для ксенолита Н-19-44 при 0.75 ГПа (рис. 3 в) равновесные изоплеты пересекаются в поле парагенезиса гранулита при 540 °C и  $f_{O_2} = -19.3$ , что соответствует 0.08 мас.%  $O_2$  в системе. На P-T диаграмме с данным количеством  $O_2$  (рис. 3 г) пересечение изоплет определяет P-T условия формирования породы – 530 °C и 0.72 ГПа, практически совпадающие с результатом для ксенолита из трубки Юбилейная.

Заметим, что при включении в эффективный состав ядер клинопироксена равновесные составы минералов на фазовых диаграммах не воспроизводятся, что является дополнительным свидетельством их магматического происхождения [7].

Для восстановления условий образования пород также использовались встроенные в программу RTQuick Д.В. Доливо-Добровольского Grt–Сrx– [12], Grt–Орх– [13, 14] и Сrx–Орх– [15, 16] геотермометры, а также Grt–Орх– [17] и Grt–Сrx–Pl–Q– [18] геобарометры, которые наиболее широко применяются в петрологических исследованиях. При расчетах использовались средние значения составов контактирующих минералов. В клинопироксенах учитывалось вхождение  $Fe^{3+}$ .

Результаты термобарометрии (рис. 4) показывают схожесть термальных условий формирования пород: для каждого гранулита

наблюдается высокотемпературное поле, ограниченное линиями Сrx–Орх–термометра, и низкотемпературное поле, ограниченное линиями Grt-содержащих термометров. По давлению поля ограничены линиями Grt–Орх– и Grt–Сrx–Pl–Q–барометров. Для гранулита ЮБ-19-05 температурные этапы находятся в диапазонах 790–890 °C, 0.63–1.14 ГПа и 520–610 °C, 0.68–0.90 ГПа соответственно (рис. 4 а); для гранулита Н-19-44 поля соответствуют диапазонам 800–880 °C, 0.61–0.97 ГПа и 530–650 °C, 0.68–0.81 ГПа (рис. 4 б). Результаты, полученные моделированием фазовых равновесий, попадают в низкотемпературные интервалы, установленные геотермобарометрией.

Наличие двух температурных полей для каждой породы указывает на регрессивный тренд метаморфизма, а зафиксированные P-T интервалы – на образование изученных пород в условиях низов гранулитовой фации с последующим охлаждением до условий низов амфиболитовой фации.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По коровым ксенолитам из кимберлитовых трубок Юбилейная и Новинка имеются лишь единичные публикации. В одной из них приведен

общий диапазон P-T условий для гранулитов из трубок Юбилейная и Комсомольская: 650–850 °C при 0.75–0.95 ГПа [19]. Впоследствии для гранат-пироксеновых гнейсов и гранулитов из трубки Новинка были восстановлены температуры 740–860 °C и ниже-среднекоровые давления 0.79–1.01 ГПа (рис. 4) [6], там же сообщается о первой находке скаполита в гранат-пироксеновом гнейсе, свидетельствующей о присутствии рассолов и дефиците водного флюида при формировании нижней коры в неорархее (2.7 млрд лет).

В исследованных нами ксенолитах найдены другие свидетельства весьма ограниченного количества воды во флюиде. Так, моделирование фазовых равновесий показало стабильность гранулитового парагенезиса при P-T условиях низов амфиболитовой фации метаморфизма. Сохранение равновесных граната, двух пироксенов и плагиоклаза в таких условиях возможно лишь при дефиците водного флюида, иначе в породе образовался бы амфиболитовый парагенезис (возможно, с гранатом). О сухом флюиде с рассолами и галогенами при формировании коровых гранулитов в условиях амфиболитовой фации метаморфизма сообщалось в статье по ксенолитам из трубки Удачная [7]. Заметим, что изученные в данной работе ксенолиты из трубок Юбилейная и Новинка показывают самые низкие P-T условия метаморфизма, когда-либо фиксируемые в гранат-двупироксеновых гранулитах в природе.

Еще одна особенность изученных пород связана с сохранением в них регрессивного P-T тренда метаморфизма – с одной стороны ожидаемого, а с другой – никогда ранее не фиксированного. P-T тренды метаморфизма, как сохранение в породе “замороженных” минеральных равновесий, не характерны для ниже-среднекоровых гранулитов, т.к. эти породы, как полагают многие, претерпели крайне длительное и медленное охлаждение, сопоставимое по времени с остыванием глубинных областей кратонов.

Каким же образом гранулиты сохранили запись об остывании? Мы полагаем, что ответ кроется в разных температурах “закрытия” двупироксенового обменного равновесия [15, 16], где участвует крупный, медленно диффундирующий катион кальция, и равновесий с участием граната и пироксенов [12–14], где в основном происходит более быстрый Fe–Mg-обмен катионами между минералами. Эти различия нам удалось установить в результате внимательного изучения закономерностей в изменении

составов минералов на контакте друг с другом (рис. 2 а–в). Примечательно, что метод моделирования фазовых равновесий, в котором используется эффективный состав породы, не позволил восстановить ранний этап метаморфической эволюции – только ее позднюю стадию.

Установленное в ходе проведенного исследования субизобарическое охлаждение пород из условий гранулитовой фации в низы амфиболитовой фации с сохранением равновесных минеральных парагенезисов гранулитов хорошо согласуется с гипотезой образования ниже-среднекоровых гранулитов в результате магматической и метаморфической эволюции глубинных габброидных интрузивов, выплавленных из поднимающейся астеносферной мантии [3, 20].

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-17-00206-П. Аналитические данные были получены в Лаборатории локальных методов исследования вещества (кафедра петрологии и вулканологии, Геологический факультет МГУ, Центр коллективного пользования “Электронно-зондовый микроанализ минерального вещества”) при помощи электронно-зондового микроанализатора Superprobe “JEOL” JXA-8230, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bohlen S.R., Mezger K.* Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust // *Science*. 1989. V. 244. № 4902. P. 326–329.
2. *Brown M., Johnson T.* Time’s arrow, time’s cycle: Granulite metamorphism and geodynamics // *Mineralogical Magazine*. 2019. V. 83. № 3. P. 323–338.
3. *Rudnick R.L.* Making continental crust // *Nature*. 1995. V. 378. № 6557. P. 571–578.
4. *Koreshkova M.Y., et al.* Petrology and geochemistry of granulite xenoliths from Udachnaya and Komsomolskaya kimberlite pipes, Siberia // *Journal of Petrology*. 2011. V. 52, № 10, P. 1857–1885.
5. *Jin T., et al.* Water content and deformation of the lower crust beneath the Siberian Craton: evidence from granulite xenoliths // *The Journal of Geology*. 2021. V. 129. № 5. P. 475–498.
6. *Shatsky V.S., et al.* Features of the Structures and Evolution of the Lower Part of the Continental Crust of the Yakutian Diamondiferous Province within the Upper Muna Kimberlite Field // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 507. Suppl 3. P. S365–S374.

7. *Perchuk A.L., et al.* Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // *Precamb. Res.* 2021. V. 357. P. 106122.
8. *Holland T.J.B., Powell R.* An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids // *Journal of metamorphic Geology.* 2011. V. 29. № 3. P. 333–383.
9. *Holland T.J.B., et al.* Melting of peridotites through to granites: a simple thermodynamic model in the system KNCFMASHTOCr // *Journal of Petrology.* 2018. V. 59. № 5. P. 881–900.
10. *Fuhrman M.L., Lindsley D.H.* Ternary-feldspar modeling and thermometry // *American mineralogist.* 1988. V. 73. № 3–4. P. 201–215.
11. *Green E.C.R., et al.* Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks // *Journal of Metamorphic Geology.* 2016. V. 34. № 9. P. 845–869.
12. *Krogh E.J.* The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* 1988. V. 99. P. 44–48.
13. *Harley S.L.* An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* 1984. V. 86. № 4. P. 359–373.
14. *Лаврентьева И.В., Перчук Л.Л.* Ортопироксен-гранатовый термометр: эксперимент и теоретическая обработка банка данных // *Доклады АН СССР.* 1990. Т. 310. № 1. С. 179.
15. *Wells P.R.A.* Pyroxene Thermometry in Sample and Complex System // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* 1977. V. 62. P. 129–139.
16. *Bertrand P., Mercier J.C.C.* The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? // *Earth and Planetary Science Letters.* 1985. V. 76. № 1–2. P. 109–122.
17. *Harley S.L.* The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and CaO – FeO – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> // *Journal of Petrology.* 1984. V. 25. № 3. P. 665–696.
18. *Eckert J.O., et al.* The  $\Delta H$  of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry // *American Mineralogist.* 1991. V. 76. P. 148–160.
19. *Shatsky V.S., et al.* Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U–Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes // *Precambrian Research.* 2016. V. 282. P. 1–20.
20. *Perchuk A.L., et al.* Precambrian ultra-hot orogenic factory: Making and reworking of continental crust // *Tectonophysics.* 2018. V. 746. P. 572–586.

## P-T PATHS OF COOLING AND METAMORPHISM UNDER CONDITIONS OF LOW-GRADE AMPHIBOLITE FACIES IN THE XENOLITHS OF GRANULITES IN THE SIBERIAN CRATON

**V. M. Grigorieva<sup>a</sup>, A. L. Perchuk<sup>a, b</sup>, academician V. S. Shatsky<sup>c</sup>, N. G. Zinovieva<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Department of Petrology and Volcanology, Geological Faculty, Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

<sup>c</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia.*

The paper presents the results of detailed petrological studies of mafic granulites from the Yubileinaya and Novinka kimberlite pipes, where retrograde metamorphic P-T paths were reconstructed for the first time using mineral geothermobarometry. These P-T paths demonstrate subisobaric cooling of the rocks from the P-T conditions of lower granulite facies to lower amphibolite facies in the middle crust depth. It was found that compositions of garnet, clinopyroxene, and orthopyroxene depend on the contacting mineral, reflecting the different temperatures closure temperatures of the exchange mineral reactions. The higher temperatures are determined using a two-pyroxene geothermometer, while lower ones are determined using garnet-clinopyroxene and garnet-orthopyroxene geothermometers. Using phase equilibria modeling we obtained thermodynamic conditions corresponding to the lower amphibolite facies: 540 °C, 0.76 GPa,  $\lg fO_2 = QFM + 1.7$  (Yubileinaya pipe); 530 °C, 0.72 GPa,  $\lg fO_2 = QFM + 2.2$  (Novinka pipe). The stability of the granulite paragenesis garnet+clinopyroxene+orthopyroxene+plagioclase under such P-T conditions is poorly known phenomenon that mirror a deficit of aqueous fluid during the crystallization of gabbro melts and their subsequent cooling in deep areas of cratons.

*Keywords:* continental crust, crustal xenoliths, granulites, P-T paths of metamorphism, phase equilibria modeling