

ПОЛЕВОШПАТОВАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ ВЫСОКОМЕТАМОРФИЗОВАННЫХ МЕТАПЕЛИТОВ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА (КУРСКАЯ МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ)

С. М. Пилюгин,* В. И. Фонарев,** К.А. Савко*

**Воронежский государственный университет*

***Институт экспериментальной минералогии, г. Черногловка МО*

Ультравысокие температуры пикового метаморфизма метапелитовых гранулитов Курско-Бесединского блока ВКМ были определены с помощью полевошпатовой термометрии. Химические составы реинтегрированных пертитов и мезопертитов получены с помощью методики подсчета ареальных размеров и набором локальных химических анализов минерала — хозяина и ламелей распада в каждом из зерен. Реинтегрированные составы полевых шпатов предполагают, минимальные температуры метаморфизма метапелитов в пределах 960—1050 °С. Эти данные хорошо согласуются с температурными оценками, полученными для магнетитовых кварцитов региона. Подобный подход к определению температуры, может быть, применим к широкому разнообразию кристаллических пород, в которых полевой шпат содержит структуры распада.

Метапелитовые гранулиты часто содержат разнообразные минеральные ассоциации и весьма информативны для реконструкции Т-Р условий метаморфизма. Однако не всегда удается обнаружить минеральные парагенезисы, отвечающие пиковым условиям метаморфизма. Кроме того, они не дают фактически достигнутых температур, а указывают на некоторый интервал температур стабильности парагенезисов. Учитывая относительно редкую встречаемость критических парагенезисов в метапелитовых гранулитах Курской магнитной аномалии, ограниченность информации о максимальных температурах метаморфизма, нами была предпринята попытка оценки таких температур с помощью полевошпатовой геотермометрии.

В пределах Курско-Бесединского блока Воронежского кристаллического массива (ВКМ) развиты мезоархейские образования, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации. Они представлены железистыми породами (главным образом — магнетитовыми кварцитами), метабазитами, метаультрабазитами и метапелитами (от 1—2 до 30—35 м мощностью) (рис. 1). Этот гранулитовый «блок» расположен среди мигматитов и гнейсов нерасчлененного Обоянского архейского комплекса, метаморфизованного преимущественно в регрессивной амфиболитовой фации. В магнетитовых кварцитах региона нами были обнаружены уникальные орто- и клинопироксены со структурами

распада (рис. 2), позволившие впервые определить ультравысокую температуру пикового метаморфизма пород величиной $\geq 1000^\circ\text{C}$ [5] (рис. 3). Ассоциирующие с железистыми породами метапелиты представлены гнейсами массивными или неяснополосчатыми, средне-крупнозернистыми. Структура гранобластовая, лепидогранобластовая, порфиробластовая. Основные минеральные ассоциации: Qtz+Grt+Kfs+Crd+Sil+Spl+Bt+Mag (скв. 3550), иногда с Pl, Ilm, Py (скв. 3554), и Qtz+Grt+Kfs+Orx+Spl+Crd+Bt+Py+Mag (скв. 3553). В большинстве исследованных образцов зерна полевых шпатов содержат разнообразные пертитовые (рис. 4, 5, 6) и мезопертитовые (рис. 7, 8) структуры распада, которые с помощью полевошпатовой термометрии позволяют оценить температуры пикового метаморфизма.

Двуполевошпатовый геотермометр базируется на зависимости температуры от состава сосуществующих плагиоклаза и калиевого полевого шпата. Термометр может быть применен не только к парам с двумя полевыми шпатами, но также и к одному из полевых шпатов, состав которого даст минимальную температуру распада. В нашем исследовании мы применяли геотермометр [6], который как показала практика [9] хорошо зарекомендовал себя при изучении высокотемпературных метаморфических пород. Обычно для определения первичных составов распавшихся полевых шпатов — реинтегрирования, применяется методика растрового анализа на электронных микроанализаторах [17; 8; 13] (рис. 9). Однако такой метод может повлечь

систематическую ошибку матричных эффектов, так как различные составы при ареальном сканировании требуют различной абсорбции, флюоресценции и коррекции на атомный номер [4; 11]. Чтобы этого избежать, для реинтегрирования нами применялась методика подсчета в каждом зерне соотношения площадей (и составов по данным точечного энергодисперсионного анализа) минерала-хозяина и ламелей распада (рис. 10). Химические составы зерен полевых шпатов, содержащих пертитовые и антипертитовые структуры распада, представлены в таблице 1 и 2.

Как видно из диаграммы (рис. 11) составы реинтегрированных полевых шпатов предполагают достаточно высокие температуры метаморфизма метапелитовых гранулитов: ≥ 960 °С для зерен с пертитовыми структурами распада и ≥ 1050 °С для зерен, содержащих мезопертитовые структуры распада. Эти оценки хорошо согласуются с данными по стабильности парагенезиса $Qtz+Sp1-T > 800$ °С в широком интервале давлений $P = 4-8$ кбар [14; 16], а также нахождением структур распада магнетита в шпинели — $T > 860$ °С [15] в изученных образцах.

Стоит отметить, что полученные температуры метаморфизма практически совпадает с данными для магнетитовых кварцитов [5] и подтверждает ультравысокотемпературные условия пикового метаморфизма в архее ВКМ. Такие температуры регионального метаморфизма для железистых формаций докембрия уверенно были установлены всего в двух регионах Скоури, Шотландия [3] и Эндерби Лэнд, Антарктика [12; 7]. Метаморфогенные пироксены со структурами распада были от-

мечены также на Украинском щите [2; 1]. В метапелитах комплекса Напир [9] описаны пертитовые и мезопертитовые полевые шпаты, в общем аналогичные обнаруженным на ВКМ и с близкими температурами кристаллизации.

Составы продуктов распада в метапелитах ВКМ (Kfs и Pl) соответствуют $T < 700$ °С (рис.11).

Интересным представляется изменение морфологии и уменьшение количества Pl ламелей в краевых частях полевых шпатов, содержащих пертитовые структуры распада (рис.12). По заключению [9] это может быть связано с падением температуры и прекращением катионного обмена в Ca- Na, K системе.

При помощи высококонтрастного BSE сканирования (сканирования в режиме отраженных электронов) на электронных микроскопах JEOL 6380 LV (ВГУ) и TESCAN VEGA 2300 (ИЭМ РАН) мы обнаружили уникальный многостадийный распад в мезопертитах (рис. 13). Нельзя не отметить, что подобный распад наблюдался нами ранее в ортопироксенах из магнетитовых кварцитов региона (рис. 2), и вероятнее всего, отражает ретроградную историю охлаждения пород.

Очевидно, что впервые полученные для гранулитового блока ВКМ ультравысокие температуры пикового метаморфизма как для метапелитов, так и магнетитовых кварцитов [5] ставят перед необходимостью новой интерпретации геологической истории региона — тектоно-термальной (метаморфической), геодинамической, магматической.

Работа выполнена при финансовой поддержке Грантов РФФИ 06-05-64088, 07-05-00292, 07-05-00891

Табл. 1

Химические составы продуктов распада в пертитах

Домен	Хозяин	Ламель	Реинтегрированный
Площадь %	$\Sigma = 72$	$\Sigma = 28$	$\Sigma = 100$
Состав вес.%	Kfs	Pl	Kfs+Pl
SiO ₂	64,55	62,93	64,1
Al ₂ O ₃	18,63	22,51	19,71
FeO	0	0	0
CaO	0,1	4,09	1,22
Na ₂ O	0,92	9,42	3,3
K ₂ O	15,22	0,12	10,99
Сумма	99,42	99,07	99,42
Si	2,99	2,8	2,94
Al	1,02	1,18	1,06
Fe	0	0	0
Ca	0	0,2	0,06
Na	0,08	0,81	0,29
K	0,9	0,01	0,64
An (мол.%)	1	19	6
Ab (мол.%)	8	80	29
Or (мол.%)	91	1	65

Химические составы продуктов распада в мезопертитах

Домен	Хозяин	Ламелль	Рейнтегрированный
Площадь %	$\Sigma= 58$	$\Sigma= 42$	$\Sigma=100$
Состав вес. %	Pl	Kfs	Pl+Kfs
SiO ₂	64,55	64,38	64,48
Al ₂ O ₃	22,62	18,84	21,03
FeO	0,12	0,56	0,31
CaO	3,56	0,14	2,12
Na ₂ O	8,85	0,5	5,34
K ₂ O	0	15,26	6,41
Сумма	99,70	99,68	99,69
Si	2,87	2,99	2,92
Al	1,19	1,03	1,12
Fe	0	0,02	0,01
Ca	0,17	0,01	0,10
Na	0,76	0,05	0,47
K	0,00	0,9	0,37
An (мол.%)	18	1	11
Ab (мол.%)	82	5	50
Or (мол.%)	0	94	39

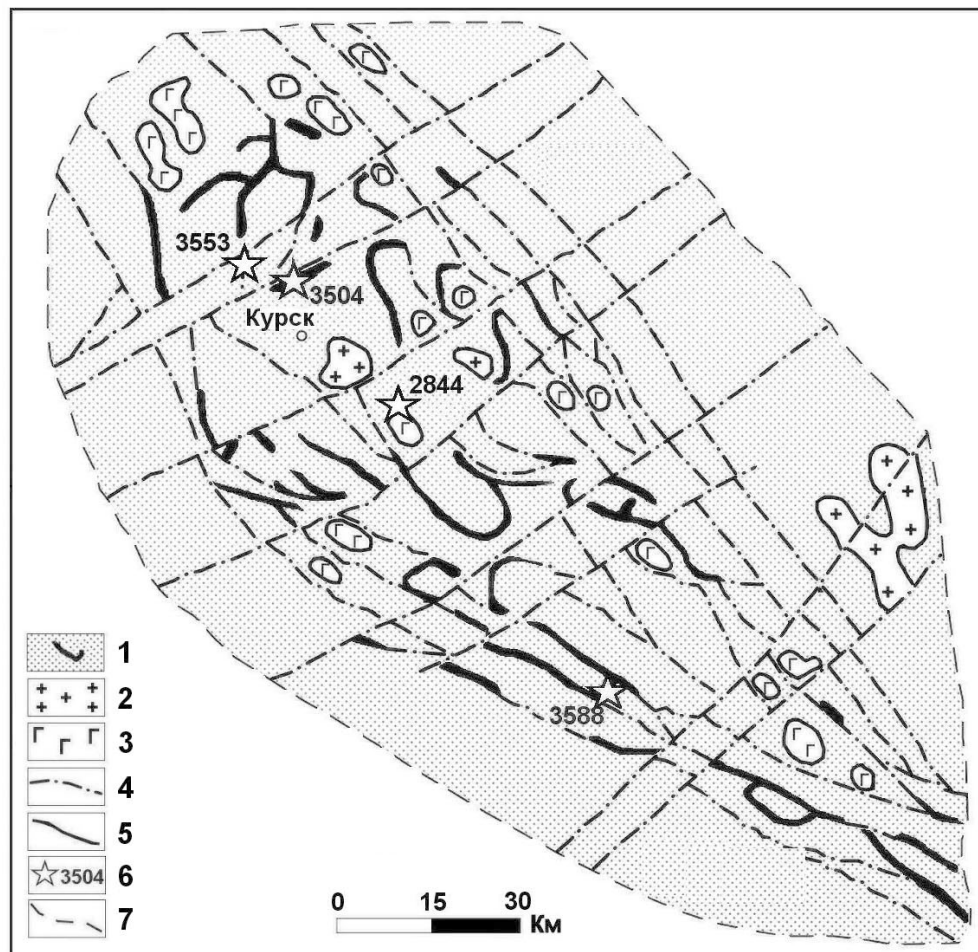


Рис. 1. Геологическая схема Курско-Бесединского блока ВКМ: 1 — высокотемпературные метаморфические комплексы с железистыми формациями; 2 — поздне- и посттектонические щелочные и полевошпатовые лейкократовые гранитоиды; 3 — метагабброиды; 4 — зоны глубинных разломов; 5 — геологические границы; 6 — местоположение скважин; 7 — границы Курско-Бесединского блока

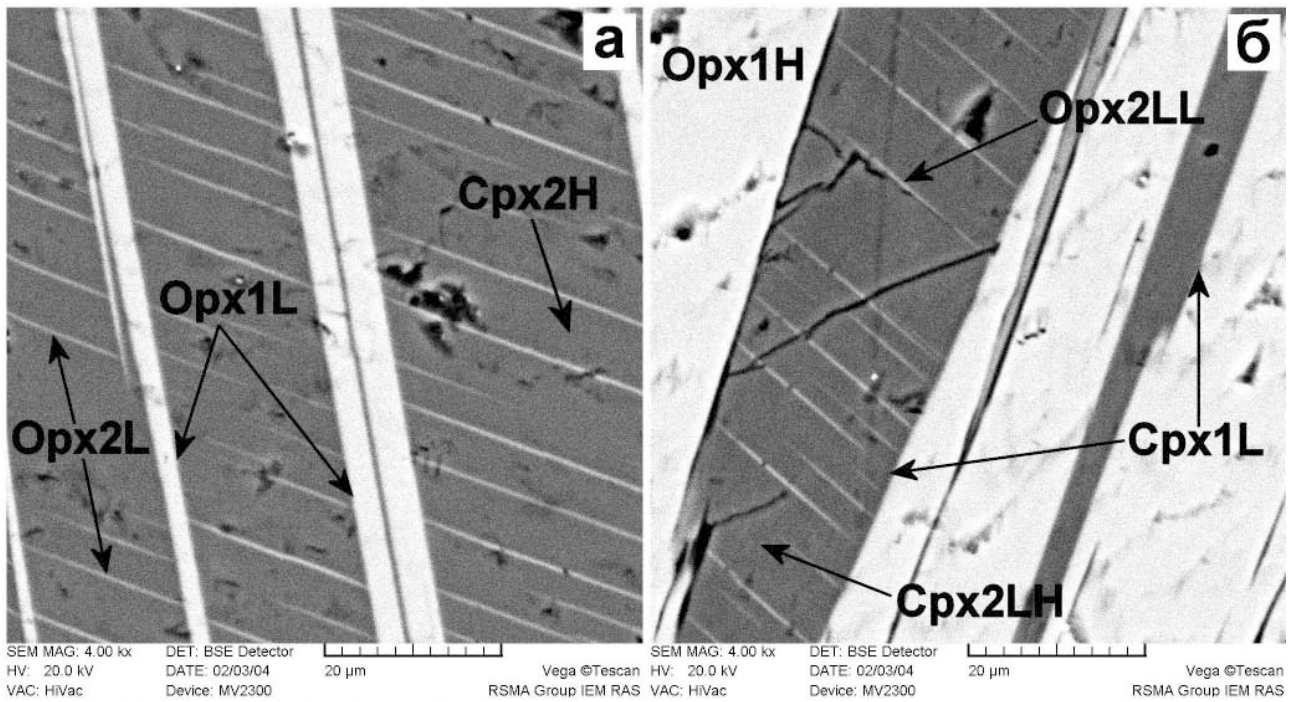


Рис. 2. Структуры распада в пироксенах железистых кварцитов Курско-Бесединского блока ВКМ (здесь и далее изображения в режиме отраженных электронов). Схема распада по (Fonarev et al., 2006).

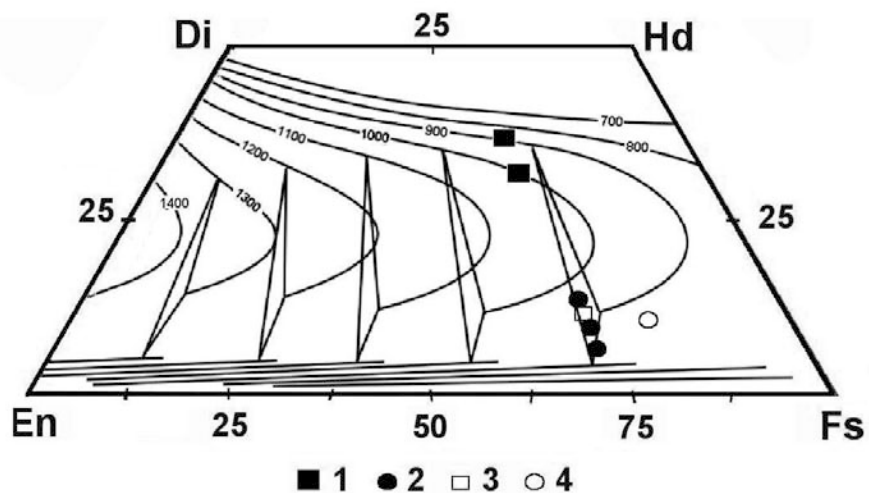


Рис.3. Политермальная диаграмма составов сосуществующих Cpх, Opх и Pг for P=10 килобар по [Lindsley, 1983] с составами первичных клинопироксенов (1, 3) и пижонитов (2, 4)

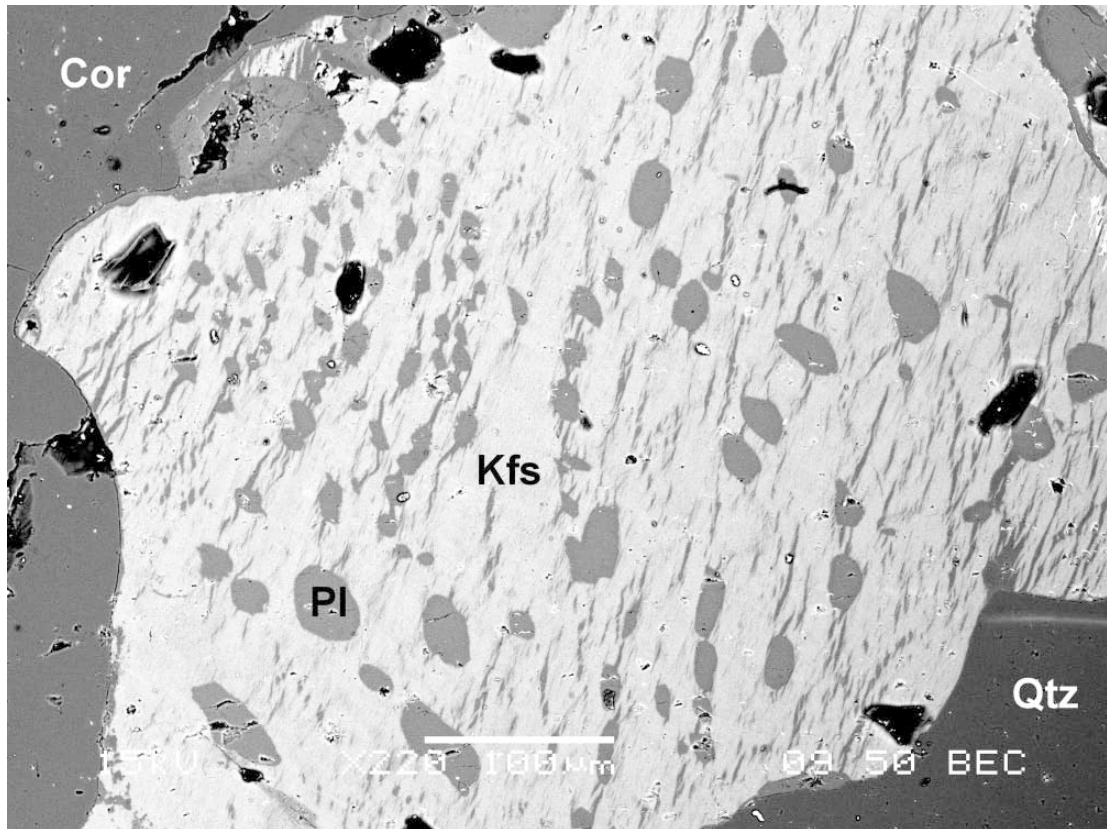


Рис. 4. Пертиты со структурами распада Kfs из метапелитовых гранулитов ВКМ

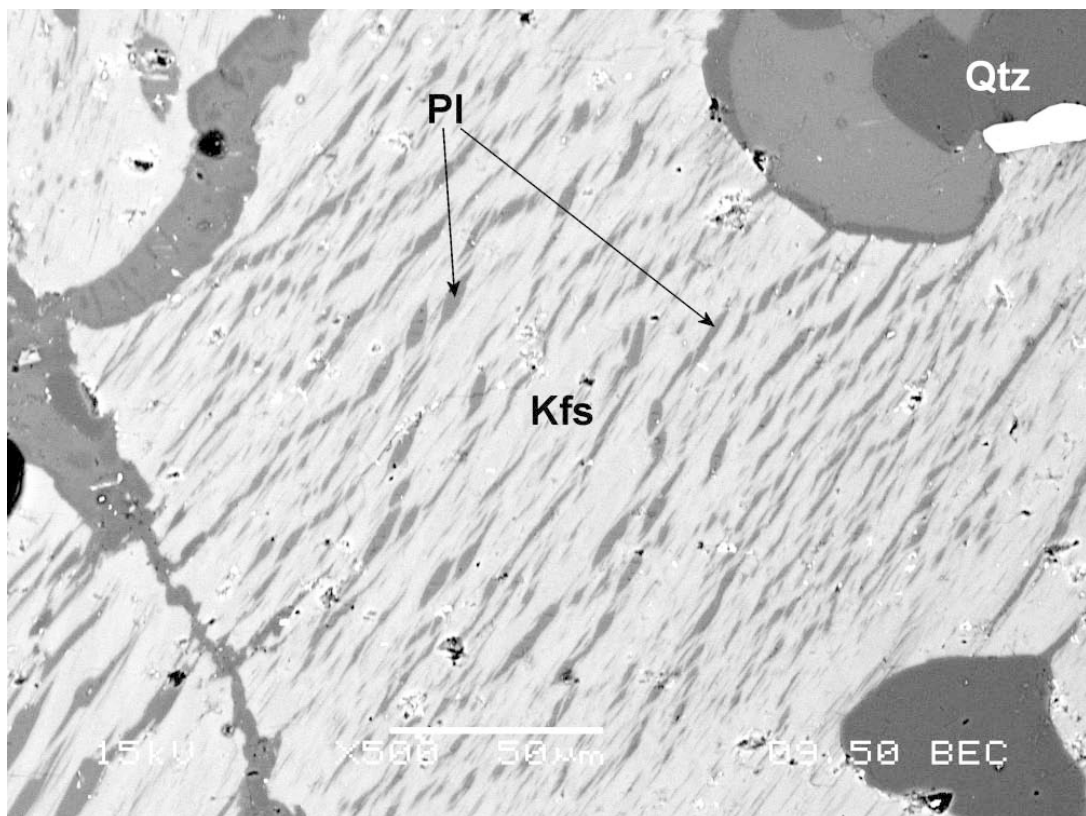


Рис. 5. Пертиты со структурами распада Kfs из метапелитовых гранулитов ВКМ

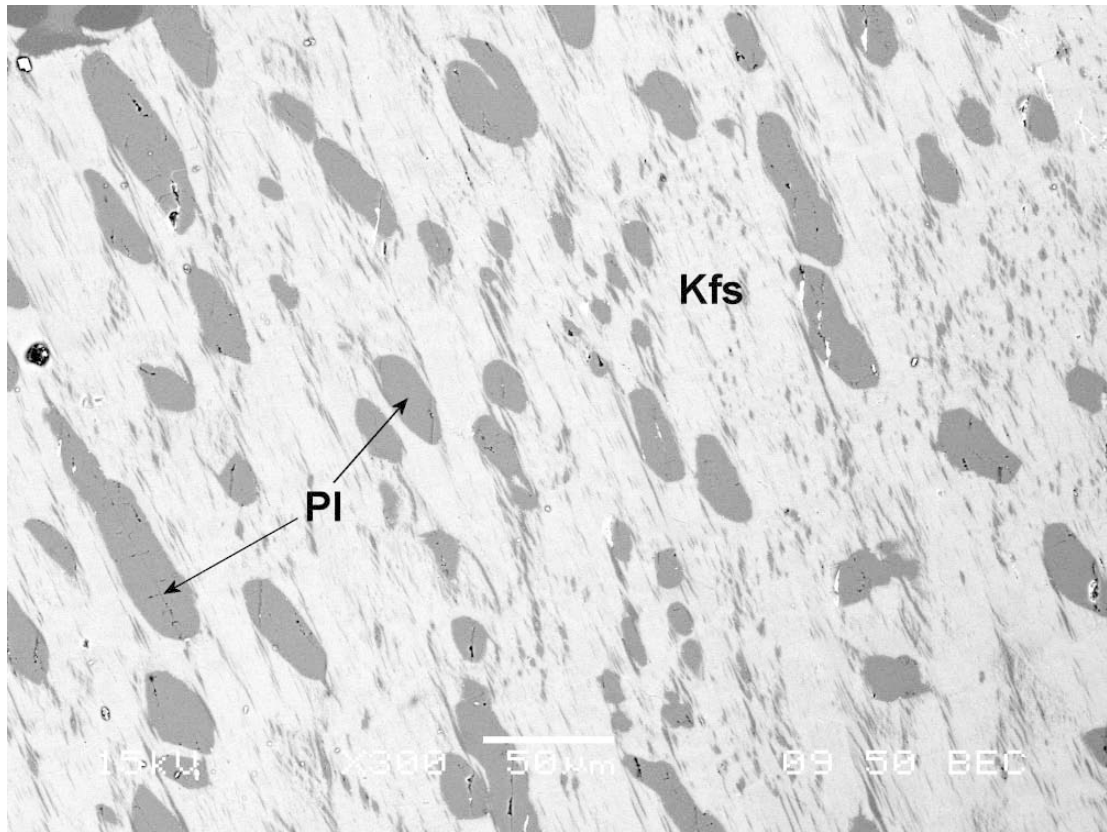


Рис. 6. Пертиты со структурами распада Kfs из метapelитовых гранулитов ВКМ

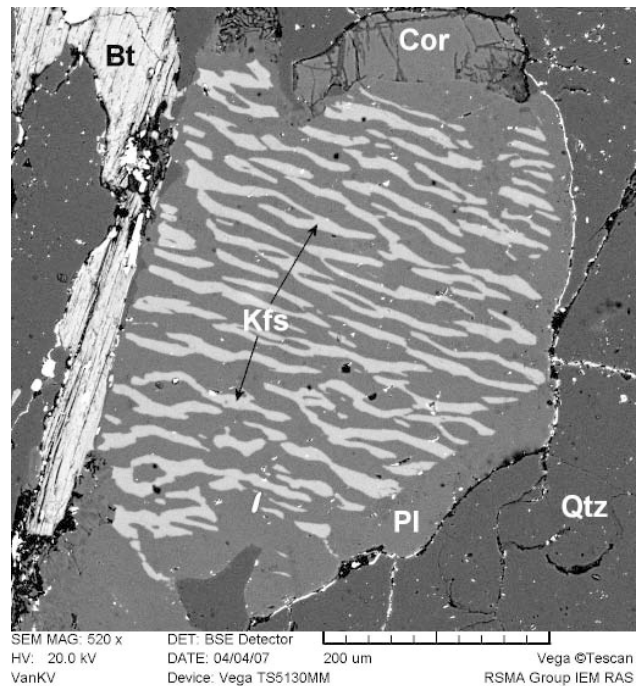
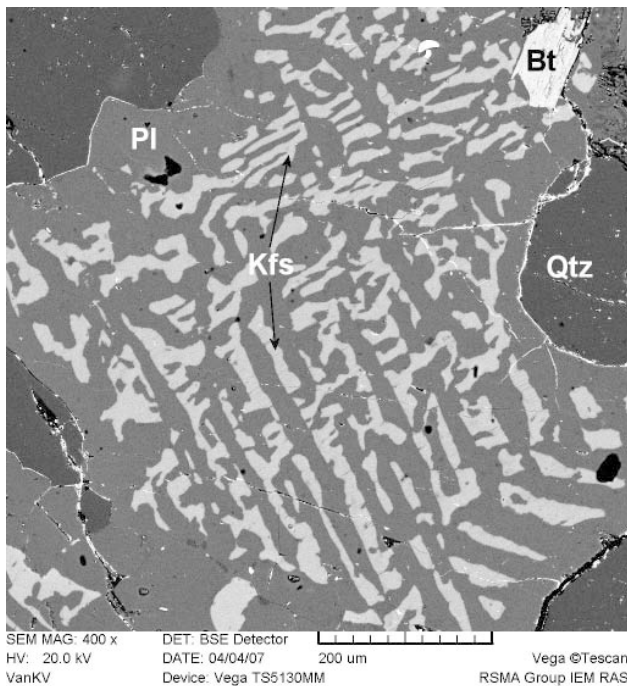


Рис. 7, 8. Мезопертиты PI-Kfs распада из метapelитовых гранулитов ВКМ

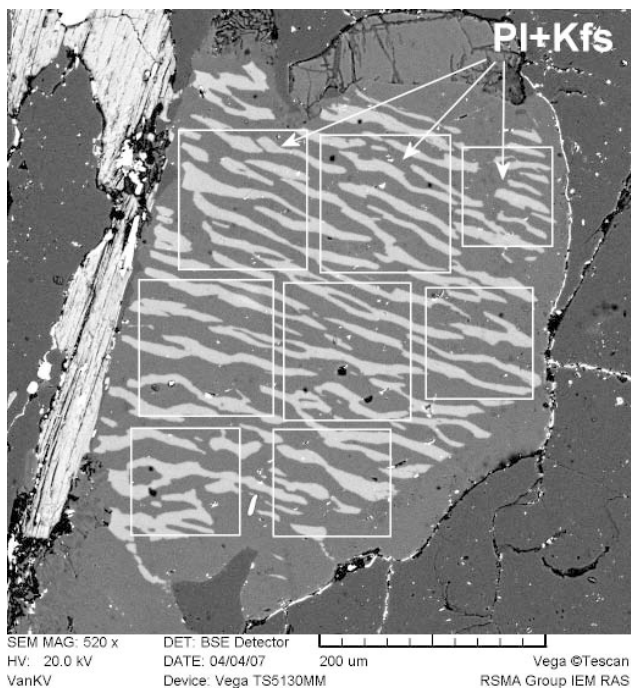


Рис. 9. Определение реинтегрированного состава зерна мезопертига методом растровой съемки

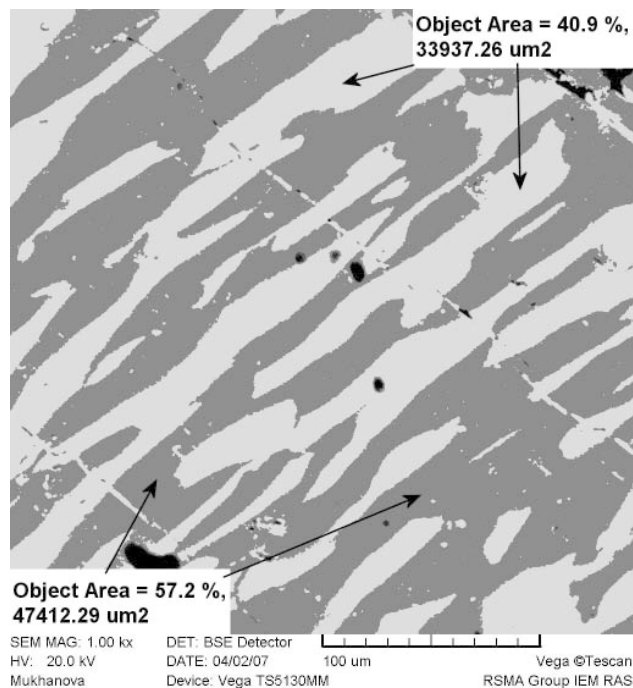


Рис. 10. Определение реинтегрированного состава зерна мезопертига методом подсчета площадей минеральных фаз и набором локальных микрозондовых определений

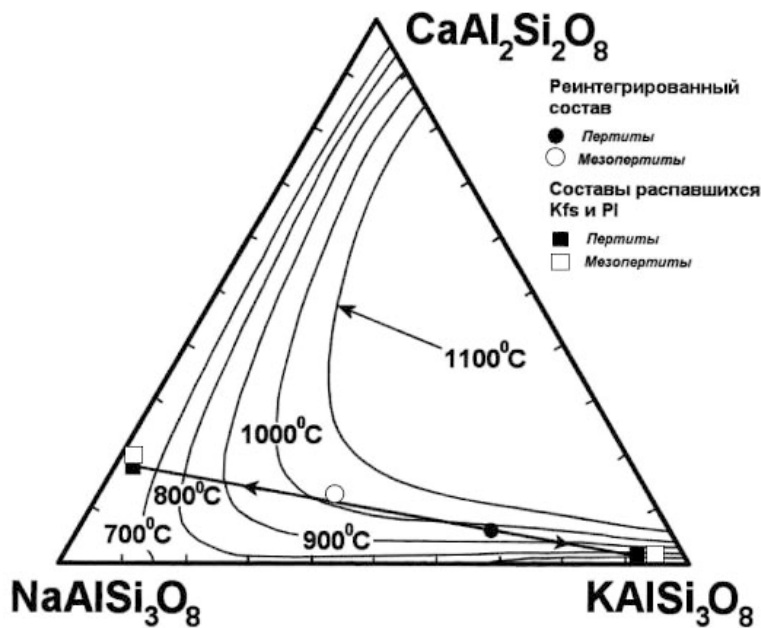


Рис. 11. Диаграмма (Ab-Kfs-An) условий метаморфизма с составами первичных полевых шпатов, а также продуктов их распада

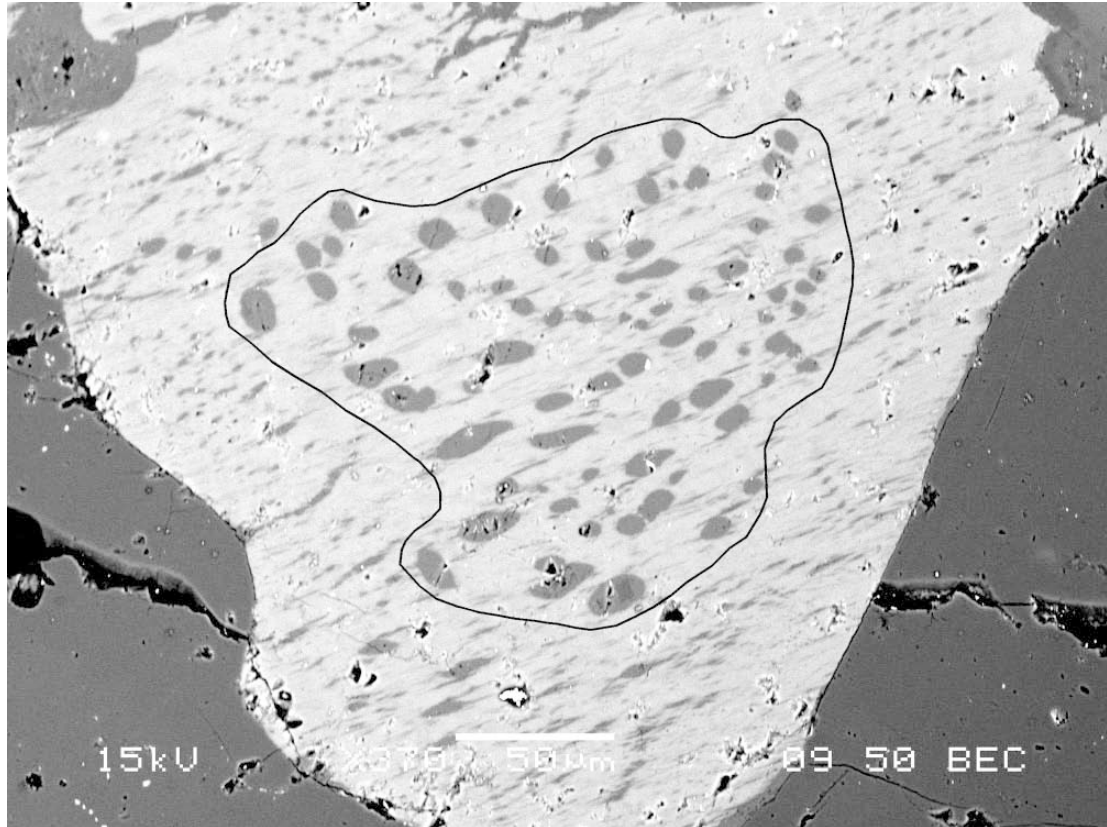


Рис. 12. Изменение морфологии и уменьшение количества PI ламелей в краевых частях пертитов

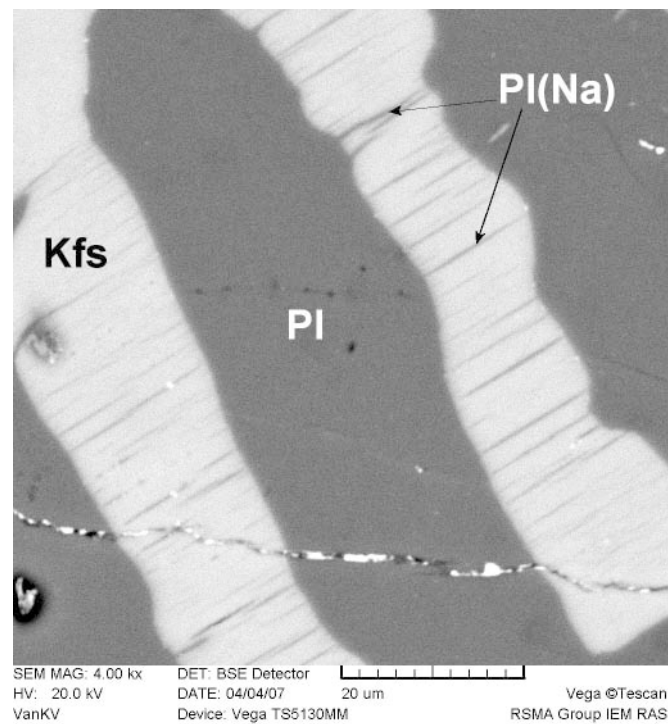


Рис. 13. Различные (2) ступени распада в мезопертитах из метapelитовых гранулитов ВКМ

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Б.Г. Термодинамические параметры высокотемпературных минеральных равновесий // Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. *Метаморфизм* / Ред. Белевцев Р.Я., Беляев О.Я., Ветренников В.В. и др. Киев: Наукова Думка, 1989. 148 с.
2. Яковлев Б.Г., Степченко С.Б. Минеральные равновесия и условия метаморфизма докембрийских мафитов. Киев: Наукова Думка, 1985. 224 с.
3. Barnicoat A.C., O'Hara M.J. High-temperature pyroxenes from an ironstone at Scourie, Sutherland // *Mineral. Mag.* 1979. V. 43. P. 371-375.
4. Bohlen, S.R. and Essene, E.J. Feldspar and oxide thermometry of granulites in the Adirondack Highlands. *Contributions to Mineralogy and Petrology* // 1977. V 62, P. 153—169.
5. Fonaев V.I., Pilugin S.M., Savko K.A., Novikova M.A. Exsolution Textures of ortho- and clinopyroxene in high-grade BIF of the Voronezh Crystalline Massif: Evidence of ultrahigh-temperature metamorphism // *J. metamorphic Geol.* 2006. V. 24. P. 135—151.
6. Fuhrman, M.L. and Lindsley, D.H. Ternary-feldspar modeling and thermometry // *American Mineralogist*, 1988. V. 73, P. 201—215.
7. Harley S.L. A pyroxene-bearing metaironstone and other pyroxene granulites from Tonagh Island, Enderby Land, Antarctica: further evidence for very high temperature (> 980°C) Archean regional metamorphism in the Napier Complex // *J. metamorphic Geol.* 1987. V. 5. P. 341—356.
8. Harley S.L. Garnet-orthopyroxene bearing granulites from Enderby Land, Antarctica: metamorphic pressure-temperature-time evolution of the Archaean Napier Complex // *Journal of Petrology.* 1985. V. 26. P. 819—856.
9. Hokada T. Feldspar thermometry in ultrahigh-temperature metamorphic rocks: Evidence of crustal metamorphism attaining ~1100 °C in the Archean Napier Complex, East Antarctica // *Am. Mineral.*, 2001. V. 86. P. 932—938.
10. Lindsley, D. H. Pyroxene thermometry // *American Mineralogist.* 1983. V. 68. P. 477—493.
11. Raase, P. Feldspar thermometry: a valuable tool for deciphering the thermal history of granulite-facies rocks, as illustrated with metapelites from Sri Lanka // *The Canadian Mineralogist* 1998. V. 36. P. 67—86.
12. Sandiford M., Powell R. Pyroxene exsolution in granulites from Fyfe Hills, Enderby Land, Antarctica: Evidence for 1000 °C metamorphic temperatures in Archean continental crust // *Am. Mineral.* 1986. V. 71. P. 946—954.
13. Sheraton J.W. et al. Geology of Enderby Land and western Kemp Land, Antarctica // *Australian Government Publishing Service, Canberra.* 1987. P. 51.
14. Shulters J.C., Bohlen S.R. The stability of hercynite and hercynite-gahnite spinels in corundum- or quartz-bearing assemblages // *J. Petrol.* 1989. V. 30. P. 1017—1031.
15. Turnock A.V., Eugster M.P. Fe-Al oxides: phase relationships below 1000 °C // *J. Petrol.* 1962. V. 3. P. 533—565.
16. Waters D.J. Hercynite-quartz granulites: phase relations, and implications for crustal processes // *Europ. J. Mineral.* 1991. V. 3. P. 367—386.
17. Whitney J.A., Stormer J. C. Geothermometry and geobarometry in epizonal granite intrusions: a comparison of iron-titanium oxides and coexisting feldspars // *Am. Mineral.* 1976. V. 61. P. 751—761.

Поступила в редакцию 20.12.06 г.