

# НОВЫЕ ДАННЫЕ О МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТЫХ ПОРОД ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬСКОЙ ГРАНУЛИТ-ГНЕЙСОВОЙ ПРОВИНЦИИ

С. М. Пилюгин<sup>1</sup>, А. Н. Конилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет,  
<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, МО

Поступила в редакцию 5 сентября 2014 г.

**Аннотация:** в железисто-кремнистых комплексах Центрально-Кольской провинции были обнаружены структуры распада твердых растворов пироксенов. Такие структуры в породах первично осадочного происхождения (магнетитовых кварцитах) представляют собой редкое явление и зачастую указывают на высокотемпературные условия метаморфизма. С использованием микронзондового анализа и подсчета площадей минеральных фаз восстановлены первичные составы ферроавгита ( $En_{20}Wo_{38}Fs_{42}$ ;  $En_{32}Wo_{37}Fs_{31}$ ) и пижонита ( $En_{24}Wo_{16}Fs_{60}$ ). По данным [1] найдено, что кристаллизация этих минералов, отвечающая первичному (пиковому) метаморфизму пород, происходила при температурах порядка 900–940°C.

**Ключевые слова:** Центрально-Кольская гранулит-гнейсовая провинция, Архей, железисто-кремнистые формации, пироксены, структуры распада, ультравысокотемпературный метаморфизм.

## NEW DATA ON THE METAMORPHIC EVOLUTIONS OF THE BANDED IRON FORMATION OF CENTRAL KOLA GRANULITE-GNEISS PROVINCE

**Abstract:** archaean banded iron formation of the Central Kola granulite-gneiss province contains coexisting clinopyroxene and orthopyroxenes with exsolution textures. Such exsolution textures in rocks of primary sedimentary origin (banded iron formation) are rare and almost always point to the ultrahigh temperature conditions for the regional metamorphism. Using electron microprobe analysis and calculation of areas of mineral phases restored primary compositions ferroaugite ( $En_{20}Wo_{38}Fs_{42}$ ;  $En_{32}Wo_{37}Fs_{31}$ ) and pigeonite ( $En_{24}Wo_{16}Fs_{60}$ ). According to [1] found that the crystallization of these minerals that meets the primary (peak) metamorphism of the rocks occurred at temperatures of 900–940°C.

**Key words:** Central Kola granulite-gneiss province, Archaean, banded iron formation, pyroxene, exsolution textures, UHT metamorphism.

### Введение

В настоящее время понятие высокотемпературного метаморфизма используется для пород, испытавших преобразования при температурах не менее 900–1100°C и давлениях 10–12 кбар. Геотектонические процессы, приводящие к такому метаморфизму, существовали уже с Архея и проявлялись практически во всей геологической истории Земли. Наиболее молодые из них установлены, по крайней мере, для варисцид (340 млн лет) Европы (в Германии, Польше, Чехии, Австрии и Франции). В большинстве случаев продукты высокотемпературного метаморфизма представлены высокоглиноземистыми ассоциациями (например, сапфирин и кварц или высокоглиноземистый ортопироксен с гранатом).

Значительно меньше данных получено для низкоглиноземистых пород, в которых практически отсутствуют высокотемпературные минеральные парагенезисы, и для которых применяются непосредственные оценки с использованием минералогических сенсоров. Среди таких объектов нами были изучены докембрийские железисто-кремнистые породы Кольской серии и комплекса Веже-Тундра Центрально-

Кольской гранулит-гнейсовой провинции. Работа основана на детальном петрографическом и микронзондовом исследовании пироксенов содержащих структуры распада твердых растворов.

### Геологическая обстановка

Центрально-Кольская гранулит-гнейсовая провинция расположена на северо-востоке Балтийского щита. Она сложена преимущественно метаморфическими породами архейского возраста. В составе Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой провинции выделяются два структурно-вещественных комплекса с недостаточно ясными стратиграфическими взаимоотношениями (рис. 1). Первый комплекс – Веже-Тундры – относительно малоглиноземистые породы: железистые кварциты, гранатовые эндербиты и кристаллосланцы; гранат-пироксеновые и гранат-амфибол-пироксеновые породы, дупироксеновые, амфибол-дупироксеновые кристаллосланцы и амфиболиты, метапироксениты. Второй комплекс – Кольская серия: биотитовые, гранат-биотитовые, силлиманит-кордиерит-биотит-гранатовые плагиогнейсы, подчиненные пласты и линзы железистых кварцитов.

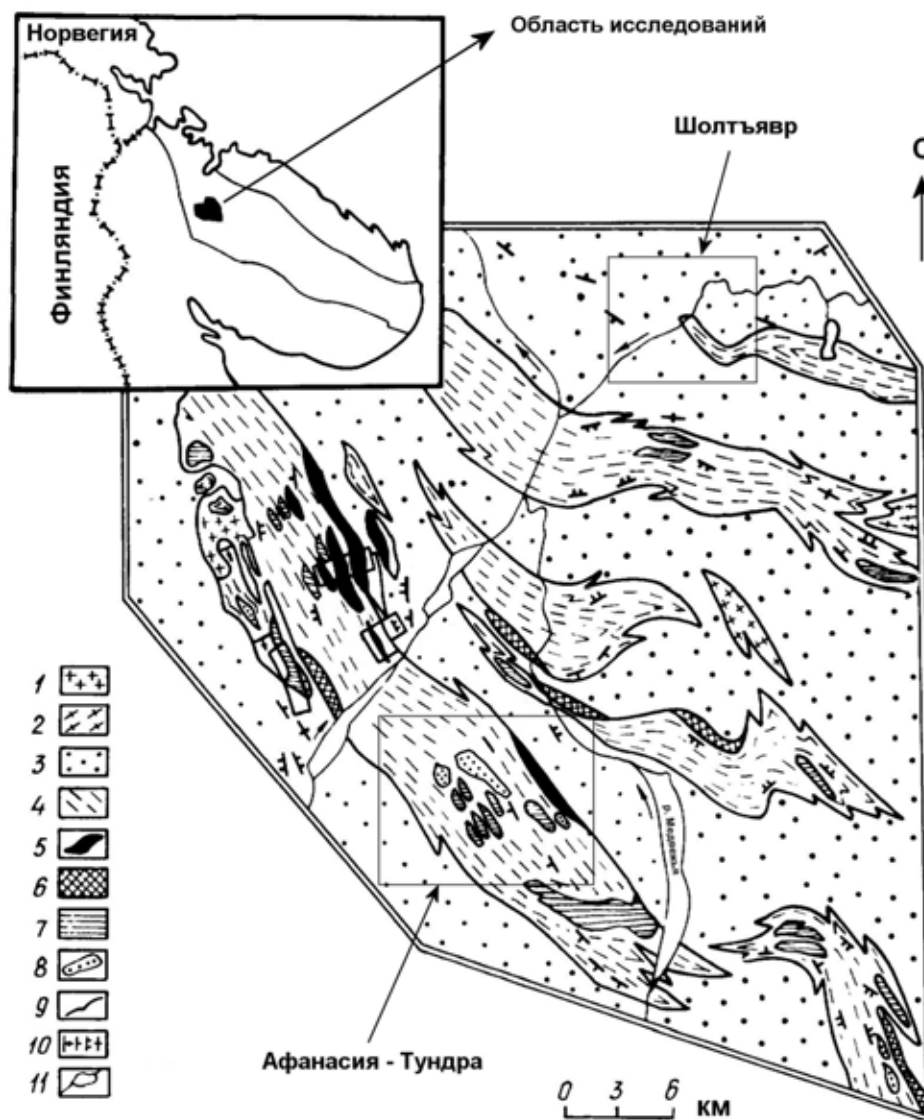


Рис. 1. Схема геологического строения Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой провинции по [2] с некоторыми изменениями. 1 – розовые ортоклазовые граниты; 2 – гранат содержащие микроклиновые граниты; 3 – кольская серия: биотитовые, гранат-биотитовые, силлиманит-кордиерит-биотит-гранатовые плагиогнейсы с прослоями и линзами железистых; 4 – 8 комплекс Веже-Тундра: 4 – дупироксеновые эндербиты и основные гранулиты; 5 – зоны ортопироксен-силлиманит-сапфириновых пород; 6 – зоны гранат-пироксеновых и гранат-роговообманковых пород; 7 – метапироксениты; 8 – железистые кварциты; 9 – геологические границы; 10 – элементы залегания; 11 – русла рек.

Геологическими границами комплексов являются тектонические трещины и зоны милонитизации и метасоматических изменений, подчеркнутые ростом в породе крупных (до 10 мм) кристаллов граната, биотита и калиевого полевого шпата.

Существует две различные точки зрения о происхождении и возрасте метаморфических комплексов Центрально-Кольской провинции [1, 3]. Согласно первой, комплексы развивались в процессе разных геотектонических мегациклов – палеоархейского (точный возраст не установлен) и неоархейского (2870–2660 млн лет). Согласно второй гипотезе, они образовались одновременно в мезоархее и сформировали Центрально-Кольский структурный комплекс.

Рассматриваемые железистые образования Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой области архея (Центрально-Кольский блок) локализованы в двух

структурно-вещественных комплексах Веже-Тундры и Кольской серии. Небольшие тела железистых кварцитов залегают непосредственно в амфиболитах и кристаллических сланцах; более крупные тела обычно расположены в переходной зоне от толщи основных пород к перекрывающим их метапелитам. Контакты рудных тел с вмещающими породами обычно четкие, резкие.

В пределах комплекса Веже-Тундры железистые кварциты изучены в районе горы Афанасия - Тундра (левобережье р. Медвежья) и опробованы по коренным выходам пород. Исследованные железистые породы Кольской серии относятся к северной полосе распространения железистых формаций Кольского полуострова и локализованы в пределах железорудных участков Шолтъявр (среднее течение р. Кица, западный берег оз. Шолтъявр). Здесь были отобраны

образцы из керна восьми скважин (1, 2, 3, 4а, 14, 15, 18, 20).

### Методы исследования

Фактической основой для настоящей работы явилось изучение коренных выходов пород и керна скважин, пробуренных при глубинном геологическом картировании и поисковых работах на железные руды. Всего было исследовано 65 образцов из разреза 12-ти обнажений и восьми скважин. В шести обнажениях (4В, 5А, 5В, 6А, 7Д, 10) и пяти скважинах (скв. 2, 3, 4а, 14, 15) обнаружены ромбические и моноклинные пироксены со структурами распада. 10 образцов из этих обнажений и скважин изучены на растровом электронном микроскопе Jeol 6510 LV с энергодисперсионным анализатором Bruker AXS (Аналитическая лаборатория ВГУ). Было выполнено от 10 до 40 определений химических составов минеральных фаз для каждого образца. Условия анализа: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда 1–10 нА, время набора спектра 70 сек, диаметр пучка обычно равнялся 3–5 мкм. В ряде случаев использовались низкие (10 кВ) ускоряющие напряжения с фокусировкой электронного пучка в области порядка 2 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводилась с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

Определение интегральных составов распавшихся минералов проводилось по методике подсчета в каждом зерне соотношения площадей (и составов по данным точечного энергодисперсионного анализа) минерала-хозяина и ламелей распада [4, 5]. Расчет площадей минерала - хозяина и ламелей распада осуществлялся при помощи компьютерного анализа высококонтрастных BSE снимков (Программа «Atlas», Tescan inc.). Расчеты температур метаморфизма проводились с помощью компьютерной программы TPF [6], оптимизация данных, полученных в результате микрондовывых анализов, была проведена на базе программ «MinFile» и «MultiEditor». Для оценки пиковых условий метаморфизма использовались опубликованные расчетные данные по устойчивости минеральных фаз при различных P-T параметрах метаморфизма [1].

### Петрография и минералогия

Внешний облик железистых кварцитов региона типичен для всех аналогичных образований. Железистые кварциты представлены плотными, средне- и крупнозернистыми породами серой и зеленовато-серой окраски, характеризующимися массивной, полосчатой и неясно-полосчатой текстурой, гранобластовой, иногда с элементами порфиробластовой, структурой. Полосчатые текстуры обусловлены ориентированным расположением минералов в виде чередующихся, часто прерывистых полос мощностью от первых миллиметров до 3–4 см. При высокотемпературном метаморфизме и перекристаллизации железистые

кварциты часто утрачивают полосчатость, в них в большом количестве появляются клино- и ортопироксены, реже гранат, резко уменьшается количество амфиболов.

По минеральному составу в изученных железисто-кремнистых породах преобладают дупироксеновые разновидности, реже отмечаются орто-, клино- или беспироксеновые (куммингтонитовые, куммингтонит-роговообманковые) породы (рис. 2). Нередко присутствуют гранат, плагиоклаз, актинолит.

**Клинопироксен** (зеленоватый в шлифах) присутствует в породе в виде относительно крупных, часто субидiomорфных зерен (порфиробласт) размером от 0,5 до 1,5 мм с неровными корродированными границами (рис. 2 а, в). Нередко эти зерна разбиты многочисленными трещинами на отдельные фрагменты. По химическому составу клинопироксены характеризуются железистостью  $(Fe/Fe+Mg) = 0,41–0,67$  ат. % и относятся к ферроавгитам. Содержание кальция в них варьирует в довольно узких пределах (0,5 мас.%) (таблица 1). Наиболее магнезиальные (до 11 мас. % MgO) и глиноземистые (до 0,8 мас. %  $Al_2O_3$ ) клинопироксены были встречены в магнетитовых кварцитах Кольской серии. Клинопироксены содержат микропримеси натрия (до 0,4 мас.%) и марганца (до 0,3 мас.%). Содержание таких компонентов как титан и хром, в большинстве случаев, ниже порога чувствительности микроанализатора.

Зерна **ортопироксена** имеют также крупные размеры (в среднем 300 мкм), неправильную, реже изометричную форму (рис. 2 а, в). Минерал в шлифах бесцветен и плеохроирует в желтоватых тонах. Ортопироксены (гиперстены) в большинстве случаев характеризуются высокой железистостью ( $X_{Fe} = 0,59–0,76$  ат.%) микропримесями кальция (до 1 мас.%) и алюминия (до 0,4 мас.%). Как и в случае с клинопироксенами, наиболее магнезиальные составы ортопироксенов были получены для железистых кварцитов Кольской серии (таблица 1, обр.14–75).

Обращает на себя внимание одна весьма важная особенность рассматриваемого комплекса пород, отличающая их от большинства продуктов гранулитового метаморфизма. Это – относительно высокая гомогенность пироксенов (как индивидуальных зерен, так и ламелей) по составу (таблица 1).

**Гранат** представлен кристаллами неправильной формы, часто «разлапистыми» и сильно удлинёнными, а также в виде кайм между пироксенами и магнетитом (рис. 2 г). По составу гранаты (альмандины) железистые ( $X_{Fe} = 0,82–0,87$ ). В крупных кристаллах граната железистость несколько увеличивается на контактах с ортопироксеном. Явно выраженной химической зональности в кристаллах граната не установлено.

**Амфиболы** представлены роговой обманкой и куммингтонитом, как правило, замещающими пироксены (рис. 2 а, б). Роговые обманки, развивающиеся по ортопироксенам, достаточно глиноземистые и имеют почти такую же железистость как и сосуществующие с ними ортопироксены. Куммингтонит также

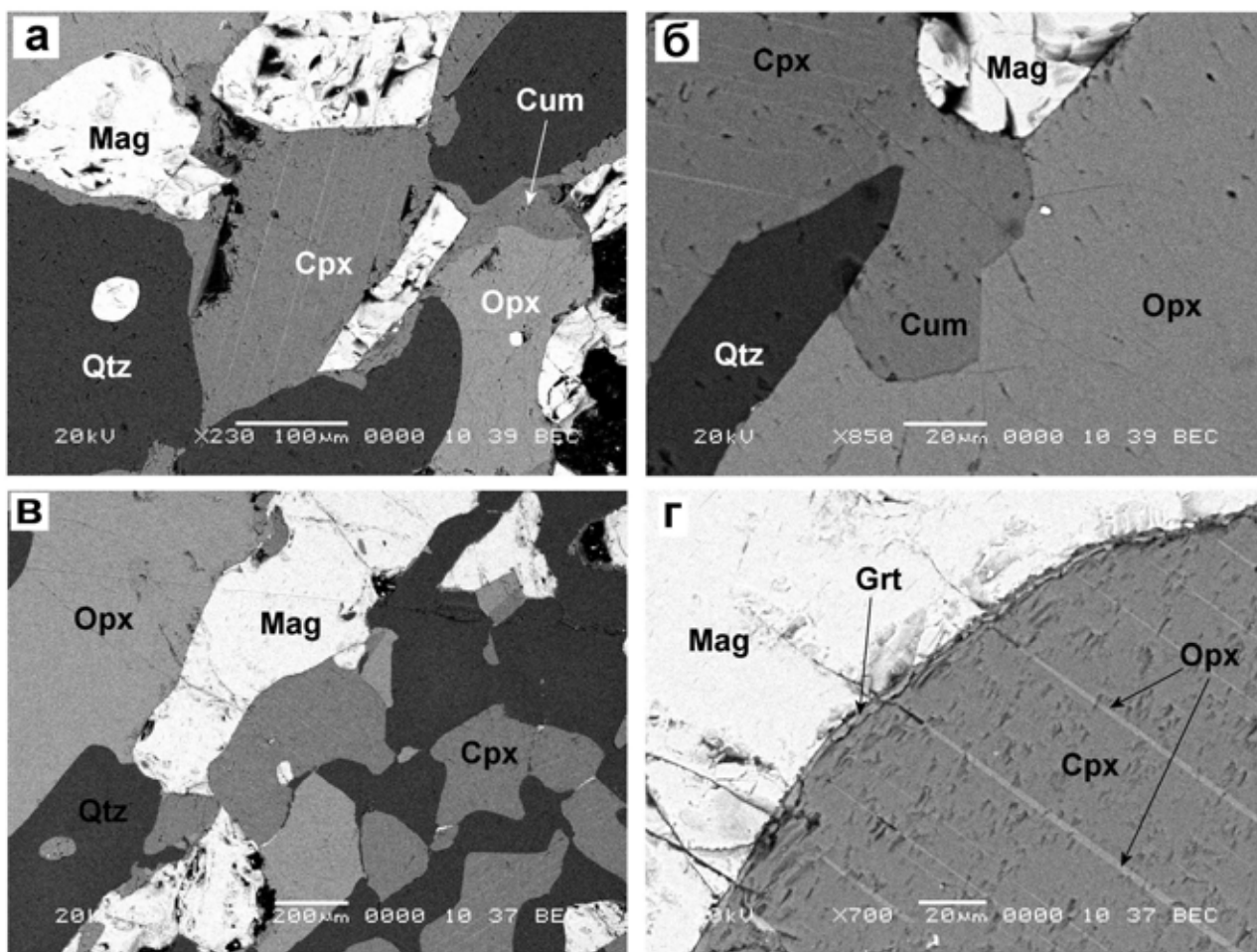


Рис. 2. Электронно-микроскопические фотографии магнетитовых кварцитов: а, б – ассоциация магнетита, кварца, орто-и клинопироксена и куммингтонита (символы минералов по [7]); в – замещение ортопироксена куммингтонитом; г – буферная зона между зернами магнетита и клинопироксена, заполненная гранатом.

Таблица 1

*Химические составы пизжонита, первичного ферроавгита и продуктов их распада из железистых кварцитов Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой провинции*

№ образца	6А (комплекс Веже-Тундра)					14-75 (комплекс Шолтъявр)			
	67%	33%	100%	83%	17%	100%	85%	15%	100%
% мин. фазы	67%	33%	100%	83%	17%	100%	85%	15%	100%
Минерал	ОрхН*	СрхL	Pgt	СрхН	Орх1L	PCрх	СрхН	Орх1L	PCрх
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	49,60	51,04	50,07	50,67	49,29	50,43	52,64	50,53	52,32
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0,28	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31	0,18	0,28	0,36	0,39	0,35	0,18	-	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0,12	-
FeO	41,17	19,54	34,03	21,00	41,35	24,46	15,55	35,28	18,51
MnO	0,52	0,27	0,44	0,06	0,65	0,16	-	0,34	0,05
MgO	7,77	7,15	7,57	6,50	7,19	6,61	10,77	12,01	10,95
CaO	0,62	20,71	7,25	20,58	0,53	17,17	20,50	1,15	17,59
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,21	0,07	0,09	0,12	0,1	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Сумма</b>	<b>99,99</b>	<b>99,14</b>	<b>99,71</b>	<b>99,25</b>	<b>99,53</b>	<b>99,28</b>	<b>99,64</b>	<b>99,70</b>	<b>99,61</b>

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Si	2,04	2,02	2,04	2,02	2,05	2,02	2,03	2,03	2,03
Ti	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-
Al	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	-	0,01
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>III</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>II</sup>	1,42	0,65	1,16	0,70	1,43	0,82	0,50	1,18	0,60
Mn	0,02	0,01	0,02	-	0,02	0,01	-	0,01	-
Mg	0,48	0,42	0,46	0,39	0,44	0,39	0,62	0,72	0,63
Ca	0,03	0,88	0,32	0,88	0,02	0,74	0,85	0,05	0,73
Na	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X(Fe)	<b>0,75</b>	<b>0,61</b>	<b>0,72</b>	<b>0,64</b>	<b>0,77</b>	<b>0,68</b>	<b>0,45</b>	<b>0,62</b>	<b>0,49</b>

\* - ОрхН – матричный гиперстен, СрхН – матричный ферроавгит, Срх1L, Орх1L – ламели распада в матричных зернах, Pgt – первичный пижонит, РСрх – первичный ферроавгит.

преимущественно развивается по краям ортопироксенов, но встречается чаще, чем роговая обманка. По составу он несколько менее железистый ( $X_{Fe} = 0,58$ ), чем сосуществующий с ним ортопироксен ( $X_{Fe} = 0,62$ ).

**Магнетит** развит неравномерно в виде прослоев между зернами кварца, орто-клинопироксенов и кумингтонита. В породах можно выделить два морфологических типа зерен магнетита: первые тип представлен крупными (более 1 мм) часто вытянутыми зернами неправильной формы, второй тип сложен мелкими (менее 100 мкм) зернами часто находящимися в виде включений в пироксенах (рис. 2 а, в). По химическому составу все зерна магнетита практически не содержат примесей.

**Кварц** представлен крупными (в среднем 1 мм), неправильными, реже изометричными зернами, и его количество составляет примерно 30 % от общего объема породы.

#### Структуры распада в пироксенитах

При детальном микроскопическом изучении в магнетитовых кварцитах нами были обнаружены уникальные реликтовые орто- и клинопироксены со структурами распада (рис. 3). Аналогичные структуры минералов в железистых формациях – продуктах регионального метаморфизма описаны ранее в четырех регионах – Скоури, Шотландия [8], Эндерби Лэнд, Антарктида [9], Воронежский кристаллический массив [10] и Украинский щит [11–13].

Структуры распада в клинопироксене представлены двумя типами. Первый тип – это относительно крупные (до 5–10 мкм) протяженные ламели ортопироксена (Орх1L) в матричном клинопироксено-хозяине (СрхН). Второй тип (результат последующего распада клинопироксена) – очень тонкие (порядка 1 мкм) относительно короткие и часто расположенные в другом направлении ламели ортопироксена (Орх2L)

(рис. 3 а, б). В ортопироксене (ОрхН) были встречены структуры распада представленные как мелкими (1–5 мкм), так и крупными (5–20 мкм) протяженными ламелями клинопироксена (СрхL) (рис. 3 в, г).

Интегральные составы первичных ферроавгитов (РСрх) ( $En_{20}Wo_{38}Fs_{42}$  – для комплекса Веже-Тундра;  $En_{32}Wo_{37}Fs_{31}$  – для Кольской серии) были определены на микрозонде при специальной съемке с набором локальных анализов и подсчетом в каждом зерне соотношения площадей минерала-хозяина и ламелей распада.

Найдено, что железистость первичных ферроавгитов (Срх Р) варьирует в достаточно широких пределах 0,49 – 0,68 при практически неизменном содержании кальция (17,17 – 17,59 мас.%) (таблица 1; рис. 4). Продукты распада ферроавгитов (Срх Н) по составу заметно обособляются от реинтегрированных зерен: различия проявляются в содержании кальция (20–21 мас.%), а так же в железистости минеральных фаз (таблица 1; рис. 4). Близкие составы характеризуют и продукты распада ортопироксена (первичного пижонита) из комплекса Веже-Тундра – Срх L ( $CaO = 20,6 \pm 0,4$  мас.%  $X_{Fe} = 0,59–0,63$ ).

Интегральные составы первичного пижонита (Pgt) ( $En_{24}Wo_{16}Fs_{60}$ ) оценивались по аналогичной методике. В наиболее представительном случае концентрация кальция в минерале составила 7,25 мас. % при железистости 0,72 ат. % (таблица 1). Очевидно, что полученные значения содержания кальция в минерале не характерны для ромбических пироксенов. Они указывают на его происхождение в результате распада первичного пижонита с переходом (конвертацией) структуры из моноклинной в ромбическую, как это было установлено в других аналогичных случаях [14, 15].

Существенно меньшей концентрацией кальция (в среднем 0,78±0,2 мас.%) при несколько более высокой железистости (0,75) характеризуются ранний ортопироксен (Орх1Н) – один из продуктов распада

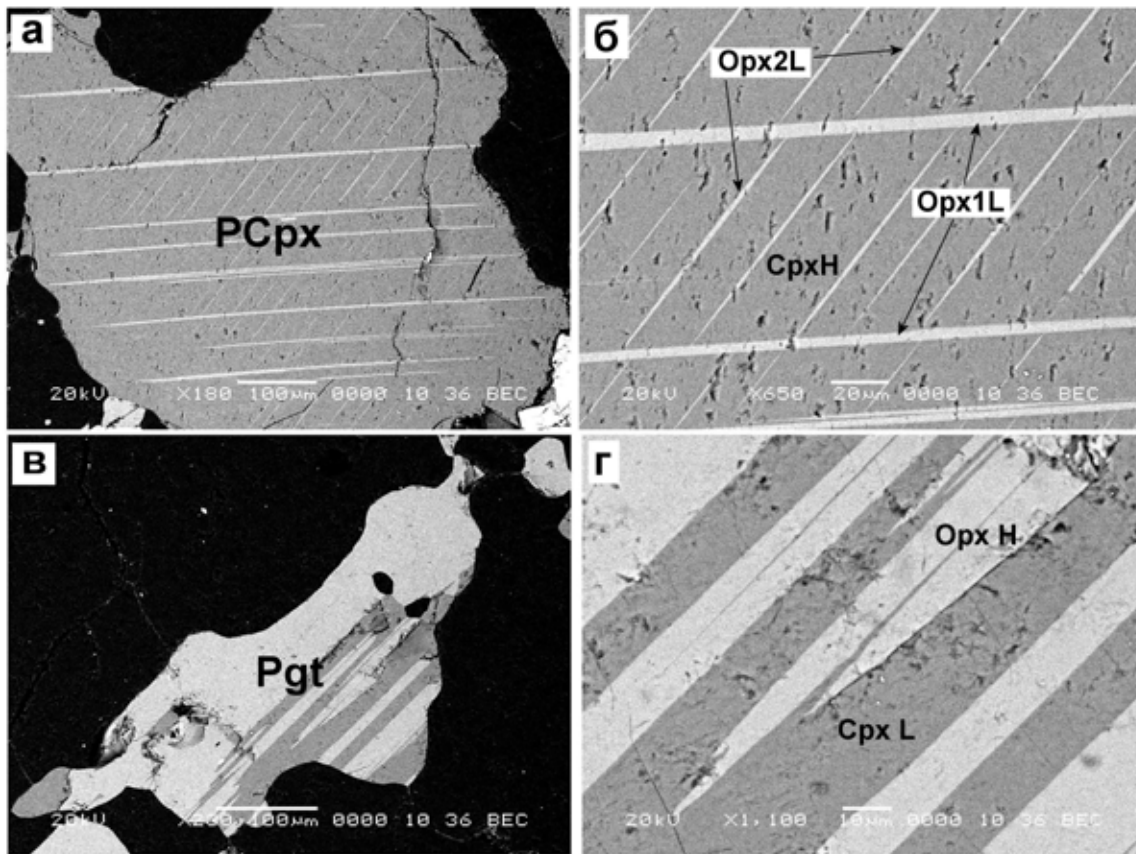


Рис. 3. Электронно-микроскопические фотографии магнетитовых кварцитов: а – зерно ферроавгита содержащего структуры распада твердого раствора; б – увеличенный фрагмент зерна ферроавгита с последовательностью распада; в – зерно гиперстена содержащего структуры распада твердого раствора; г – увеличенный фрагмент зерна гиперстена.

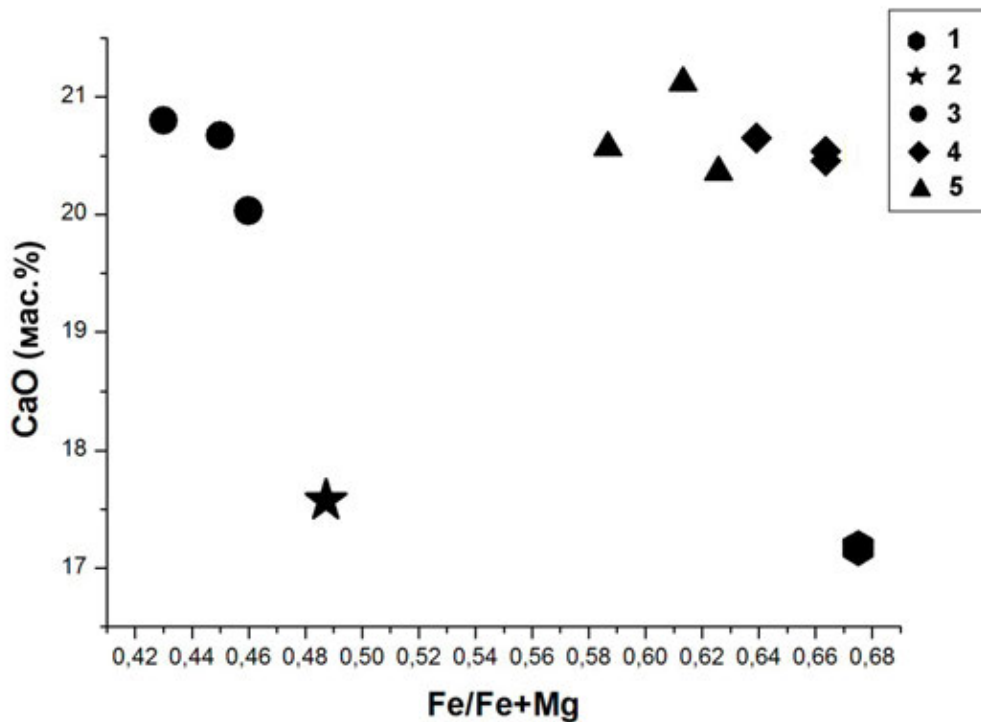


Рис. 4. Диаграмма химических составов ферроавгитов: 1 – восстановленный состав первичного ферроавгита из пород комплекса Веже-Тундра; 2 – восстановленный состав первичного ферроавгита из пород Кольской серии; 3 – матричные составы ферроавгитов Кольской серии; 4 – матричные составы ферроавгитов комплекса Веже-Тундра; 5 – составы ламелей распада ферроавгита в зернах гиперстенов из комплекса Веже-Тундра.

первичного пижонита (рис. 3 в, г), а так же ранняя генерация (Orx1L) ламелей распада первичного клинопироксена (соответственно, 0,73+/-0,2 мас.% и 0,77).

### Интерпретация полученных результатов

Оценка максимальных температур метаморфизма железистых кварцитов Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой провинции стала возможной благодаря восстановлению (реинтеграции) составов минералов устойчивых на пике метаморфизма – первичного ферроавгита и пижонита.

На рис. 5 реконструированные составы первичных ферроавгитов и пижонита совмещены с расчетными

данными (пироксеновая трапеция Линдсли [1] при  $P = 10$  кбар. Такой метод определения температуры хорошо зарекомендовал себя для большинства областей гранулитового метаморфизма и в настоящее время используется рядом исследователей [16]. Как видно из диаграммы, ферроавгиты ( $En_{20}Wo_{38}Fs_{42}$ ;  $En_{32}Wo_{37}Fs_{31}$ ) с концентрацией кальция 17,17 и 17,59 мас.% в ассоциации с пижонитом должны быть устойчивы при температурах соответственно 900 °C и 940 °C. Следует отметить, что эффект давления на устойчивость этой ассоциации незначителен [1], и необходимость введения каких-либо поправок в интервале  $P = 5-15$  кбар практически отсутствует.

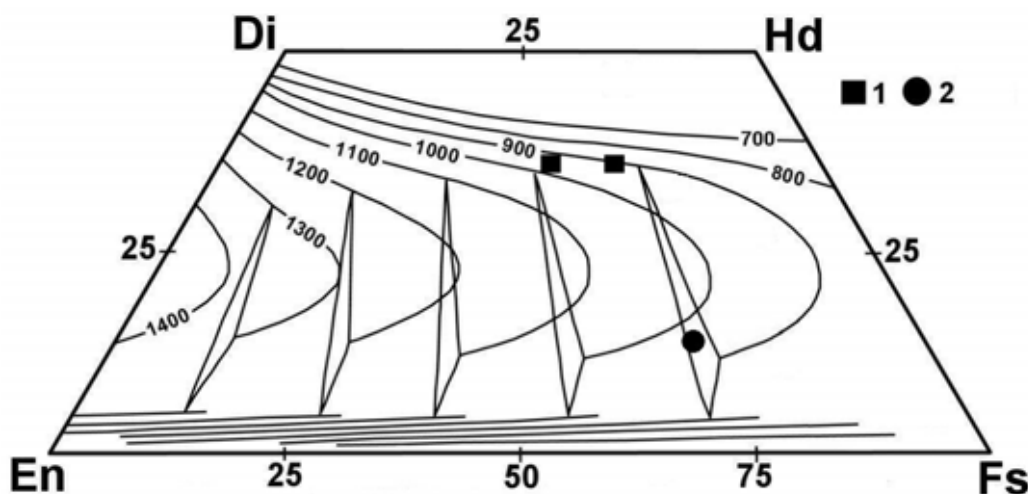


Рис. 5. Политермальная диаграмма (пироксеновая трапеция Линдсли) восстановленных составов ферроавгитов и пижонита при  $P = 10$  кбар [1] из железистых кварцитов Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой провинции. 1 – составы первичных ферроавгитов; 2 – состав первичного пижонита.

При температурах  $> 900$  °C устойчив также кальциевый пижонит ( $En_{24}Wo_{16}Fs_{60}$ ) ( $CaO = 7,25$  мас.%) с железистостью 0,72. В соответствии с зависимостью железистость – температура [1] пижониты с таким железо-магнезиальным соотношением в тройной ассоциации с орто- и клинопироксенами должны быть устойчивы при температуре 920 °C (рис. 6), а в ассоциации только с моноклинным пироксеном при более высоких температурах.

Двупироксеновая термометрия по равновесным составам распавшихся минералов для железистых кварцитов Кольской серии устанавливает температуру  $660 \pm 20$  °C, которая в пределах точности определений близка полученной для пород комплекса Веже-Тундра [2], хотя нельзя полностью исключить и наличие небольшого термического градиента в северо-восточном направлении, что, в целом, согласуется с полученными нами данными.

Процессы ретроградного метаморфизма, проходящие в условиях гранулитовой фации (675–660°C) привели к почти полной перекристаллизации магнетитовых кварцитов и ассоциирующих с ними пород (метапелитов, metabазитов). При этом сформировалась новая генерация минералов (гранаты, амфиболы, биотиты), а кинетически наиболее «стойкие» продук-

ты первичного высокотемпературного метаморфизма остались лишь в реликтах.

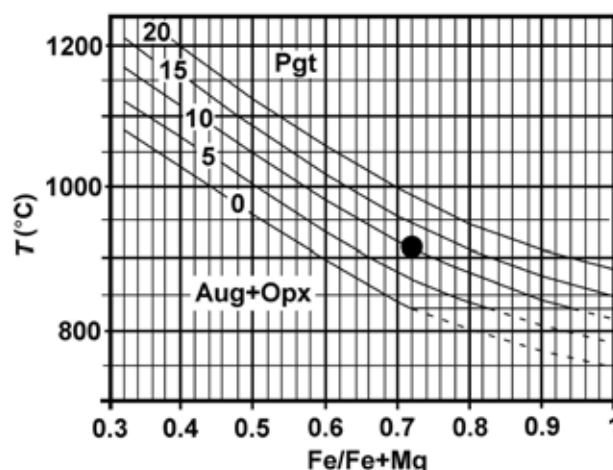


Рис. 6. Минимальная температура стабильности пижонита как функция железистости минерала по [1]. Линии соответствуют давлению 0–20 кбар. Круг – реинтегрированный состав пижонита из образца 6А (комплекс Веже-Тундра).

Полученные новые данные относительно физико-химических условий метаморфизма железистых формаций Центрально-Кольской провинции нуждаются в



объяснении такой высокой температуры пикового метаморфизма.

В соответствии с геологическими данными, метаморфизованные магнетитовые кварциты Центрально-Кольской провинции тесно связаны с архейскими метаультрабазиитами и метабазиитами. Эти породы свидетельствуют о существовании глубинного источника тепла, связанного, вероятно, с верхней мантией или астеносферой. Вместе с тепловым потоком из этого источника, базитовые и ультрабазитовые магмы, обеспечили необходимую температуру метаморфической перекристаллизации захороненных железистых осадков.

Таким образом, можно говорить о более сложной, чем предполагалось ранее, метаморфической и, следовательно, тектоно-термальной истории региона. Полученные нами температурные оценки пикового метаморфизма железисто-кремнистых комплексов Центрально-Кольской провинции ставят ее в ряд с другими регионами высокотемпературного метаморфизма, открытыми за последние два десятилетия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (Проект МК-722.2013.5).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Lindsley, D.H.* Pyroxene thermometry / D. H. Lindsley // *Am. Mineral.* – 1983. – V. 68. – P. 477–493.
2. *Fonarev, V.I.* Geological thermometry and barometry of metamorphic complexes: Central Kola archean granulite-gneiss region / V.I. Fonarev, A.N. Konilov, A.A. Graphchikov // *International Geology Review*, –1993. – V.35. – P. 4015–4035.
3. *Авакян, К.Х.* Структурное положение чарнокитоидов центральной части Кольского полуострова. Природные ассоциации серых гнейсов архея: (Геология и петрология) / К.Х. Авакян, С.В. Богданова, Л.Ф. Добржинская // *Л.: Наука.* –1984. – С. 123–133.
4. *Пилюгин, С.М.* Ультравысокие ( $\geq 1000^\circ\text{C}$ ) температуры пикового метаморфизма метапелитов Воронежского кристаллического массива (Курско-Бесединский гранулитовый блок) по данным полевошпатовой термометрии / С.М. Пилюгин, В.И. Фонарев, К.А. Савко // *ДАН*, 2009. – № 5. – С. 660–663.
5. *Hokada, T.* Feldspar thermometry in ultrahigh-temperature metamorphic rocks: Evidence of crustal metamorphism attaining  $\sim 1100^\circ\text{C}$  in the Archean Napier Complex, East Antarctica / T. Hokada // *Am. Mineral.* – 2001. – V. 86. – P. 932–938.
6. *Fonarev, V.I.* A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes / V.I. Fonarev, A.A. Graphchikov, A.N. Konilov // *Int. Geol. Review*, 1991. – V. 33. – № 8. – P. 743–783.
7. *Kretz, R.* Symbols for rock-forming minerals / R. Kretz // *Amer. Miner.* – 1983. – V.68. – P. 277–279.
8. *Barnicoat, A.C.* High-temperature pyroxenes from an ironstone at Scourie, Sutherland / A.C. Barnicoat, M.J. O'Hara // *Mineral. Mag.* – 1979. – V. 43. – P. 371–375.
9. *Harley, S.L.* A pyroxene-bearing metaironstone and other pyroxene granulites from Tonagh Island, Enderby Land, Antarctica: further evidence for very high temperature ( $> 980^\circ\text{C}$ ) Archean regional metamorphism in the Napier Complex / S.L. Harley // *J. metamorphic Geol.* – 1987. – V. 5. – P. 341–356.
10. *Fonarev, V.I.* Exsolution Textures of ortho- and clinopyroxene in high-grade BIF of the Voronezh Crystalline Massif: Evidence of ultrahigh-temperature metamorphism / V.I. Fonarev, S.M. Pilugin, K.A. Savko, M.A. Novikova // *J. metamorphic Geol.* – 2006. – V. 24. – P. 135–151.
11. *Пилюгин, С.М.* Физико-химические условия метаморфизма железисто – кремнистой формации Приазовского блока Украинского щита / С.М. Пилюгин, К.А. Савко, М.А. Новикова // *Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология.* – 2010. – № 1. – С. 121–134.
12. *Яковлев, Б.Г.* Термодинамические параметры высокотемпературных минеральных равновесий // Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Метаморфизм / Ред. Р.Я.Белевцев, О.Я.Беляев, В.В. Ветренников [и др.]. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 148 с.
13. *Яковлев, Б.Г.* Минеральные равновесия и условия метаморфизма докембрийских мафитов / Б.Г. Яковлев, С.Б. Степченко. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 224 с.
14. *Sandiford, M.* Pyroxene exsolution in granulites from Fyfe Hills, Enderby Land, Antarctica: Evidence for  $1000^\circ\text{C}$  metamorphic temperatures in Archean continental crust / M. Sandiford, R. Powell // *Am. Mineral.* – 1986. – V. 71. – P. 946–954.
15. *Vaniman, D.T.* Contact metamorphic effect of the Stillwater Complex, Montana: the concordant iron formation / D.T. Vaniman, J.J. Papike, T. Labotka // *Am. Mineral.* – 1980. – V. 65. – P. 1087–1102.
16. *Кориковский, С.П.* Чарнокитизация и эндербитизация основных гранулитов лапландского гранулитового пояса (южная часть Кольского полуострова, район Порьей Губы): I. Петрология и геотермобарометрия / С.П. Кориковский, А.Я. Аранович // *Петрология.* – 2010. – № 4. – С. 340–368.

Воронежский государственный университет

Пилюгин С.М. – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры полезных ископаемых и недропользования, ВГУ  
E-mail: geoscience@yandex.ru  
Тел.: 8 (473) 220-86-26

Институт экспериментальной минералогии РАН

Конилов А.Н. – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник  
E-mail: konilov@iem.ac.ru  
Тел.: 8 (495) 951-04-43

Voronezh State University

Pilugin S.M. – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, senior teacher department mineral resource VSU  
E-mail: geoscience@yandex.ru  
Tel.: 8 (473) 2208626

Institute of Experimental Mineralogy RAS

Konilov A.N. – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, research worker  
E-mail: konilov@iem.ac.ru  
Tel.: 8 (495) 951-04-43