

УДК 549.621.9

## **СПЕССАРТИН-ГРОССУЛЯРОВЫЕ ГРАНАТЫ МЕТАВУЛКАНИТОВ ЦЕНТРАЛЬНО-БУНДЕЛКХАНДСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО КОМПЛЕКСА БУНДЕЛКХАНДСКОГО КРАТОНА, ИНДИЙСКИЙ ЩИТ (ПАРАГЕНЕЗИСЫ, ЗОНАЛЬНОСТЬ, СТРИНГЕРЫ, ВКЛЮЧЕНИЯ)**

**О. С. Сибелев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Архейские вулканы Мауранипурской структуры Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса претерпели три стадии метаморфических и метасоматических преобразований: 1) метаморфизм амфиболитовой фации (~2,7 млрд лет), 2) регрессивный метаморфизм и сопряженные процессы метасоматоза (~2,68 млрд лет), в том числе пропилитизации, 3) метаморфизм прениит-пумпеллиитовой фации, вероятно связанный с формированием гидротермальных кварцевых жил (~1,8 млрд лет). Гранат устойчив на всех стадиях наложенных преобразований и закономерно меняет свой состав от альмандин-спессартина до гроссуляра, ассоциируя с амфиболом (состава от паргасита и чермакита до грюнерита-куммингтонита и актинолита), клинопироксеном, хлоритом, цоизитом-клиноцоизитом, калийшпатом и др. На заключительных стадиях он равновесен с кальцитом, альбитом, прениитом и пумпеллиитом. В некоторых зернах граната формируется контрастная сложная химическая зональность с резкими границами зон и изменением минерального состава включений по зонам. Количество зон (три) сопоставимо с количеством стадий эпигенеза. Благодаря контрастности BSE-изображений граната (за счет обратной зависимости содержаний FeO и CaO) рассмотрен характер зональности, выявлены стрингеры, «межзонные аномалии» и включения гроссулярового граната в спессартин-альмандиновом. Зерна граната не всегда являются закрытой системой, и в них могут протекать процессы перекристаллизации включений.

**Ключевые слова:** архей; метаморфизм; метасоматоз; парагенезисы; гранат; зональность граната; стрингеры; Бунделкхандский кратон; Индийский щит.

### **O. S. Sibelev. SPESSARTINE-GROSSULAR GARNETS IN METAVOLCANICS FROM THE CENTRAL BUNDELKHAND GREENSTONE COMPLEX OF THE BUNDELKHAND CRATON, INDIAN SHIELD: PARAGENESES, ZONING, STRINGERS, AND INCLUSIONS**

Archean metavolcanics from the Mauranipur Structure of the Central Bundelkhand greenstone complex have undergone three stages of metamorphism and metasomatism: 1) amphibolite-facies metamorphism (~2.7 Ga), 2) retrograde metamorphism and associated metasomatism (~2.68 Ga), including propylitization, and 3) prehnite-pumpellyite-facies metamorphism presumably associated with the formation of hydrothermal quartz veins (~1.8 Ga). Garnet is stable at all multiple metamorphic stages, varying in composition from almandine-spessartine to grossular, and being associated with amphibole (from

pargasite and tschermakite to grunerite-cummingtonite and actinolite in composition), clinopyroxene, chlorite, zoisite-clinozoisite, K-feldspar, etc. At the final stages of blastesis it is equiponderous with calcite, albite, prehnite, and pumpellyite. A complex, high-contrast chemical zoning with well-defined grain boundaries and zonal variations in the mineral composition of inclusions is formed in some of the garnet grains. The number of zones (three) is comparable with the number of epigenetic stages. As BSE images of the garnet have high contrast (because of the inverse relationship of FeO and CaO concentrations), the zoning pattern was examined and stringers, "interseasonal anomalies" and inclusions of grossular garnet in spessartine-almandine were revealed. Garnet grains are not always a closed system; recrystallization of inclusions may occur in them.

**Key words:** Archean; metamorphism; metasomatism; parageneses; garnet; garnet zoning; stringers; Bundelkhand Craton; Indian Shield.

## Введение

В XXI веке в метаморфической петрологии несколько изменилась методика, используемая для решения проблем определения параметров метаморфизма. В практике исследований стали широко применяться современные методы мультиравновесной минеральной термобарометрии, псевдосекций, изотопии и др. Тем не менее изучение петрографии, парагенезисов, особенностей химического состава и его изменений в типоморфных и индекс-минералах были и остаются важнейшими инструментами познания в этой области и не утратили своей актуальности.

Несомненно, один из наиболее информативных минералов для определения режимов эндогенных процессов и их изменений – это гранат [Соболев, 1964]. В зеленокаменных породах Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса (ЦБЗК) он не является породообразующим минералом и встречается далеко не повсеместно. В Мауранипурской структуре имеются единичные находки граната [Slabunov, Singh, 2019b]. В настоящей работе представлены результаты оригинальных исследований выявленных автором гранатов, гранат-содержащих минеральных ассоциаций, нестандартных особенностей химизма и внутреннего строения этого минерала, имеющих, как представляется, петрологическую значимость.

## Геологический очерк

Бунделкхандский кратон состоит главным образом из неоархейских микроклиновых гранитов [Ramakrishnan, Vaidyanadhan, 2010; Singh et al., 2019]. Среди них встречаются крупные фрагменты разгнейсованных тоналит-трондьемит-гранодиоритов, возраст которых оценивается в 3,59–3,20 млрд лет [Kaur et al., 2016]. В составе кратона выделяется три террейна: центральный, северный и южный [Slabunov,

Singh, 2019a]. Важную роль в структуре кратона играют мезо-неоархейские Центрально-Бунделкхандский (ЦБЗК) и Южно-Бунделкхандский зеленокаменные комплексы [Singh, Slabunov, 2015, 2016; Slabunov, Singh, 2019b]. ЦБЗК сложен Бабинским и Мауранипурским поясами, и его выходы прослеживаются с запада на восток примерно на 150 км (рис. 1, а).

Ранняя ассоциация ЦБЗК Мауранипурского пояса сложена тремя толщами: 1) ультрабазит-базальтовой (метаультрамафиты и метабазальты) (рис. 1, б); 2) риолит-дацитовый (кислые метавулканыты) и 3) железистыми кварцитами (BIF). Поздняя – субвулканическим телом кислых вулканитов. Контакты между толщами тектонические [Slabunov, Singh, 2019b]. В метабазальтах фиксируются пиллоу лавы [Malviya et al., 2006]. Возраст ранних кислых вулканитов –  $2813 \pm 20$  млн лет, метасоматитов –  $2687 \pm 17$  млн лет, дайки кислых пород (поздняя ассоциация) –  $2542\text{--}2557$  млн лет [Singh, Slabunov, 2015; Slabunov, Singh, 2019b]. В районе проявлены палеопротерозойские гидротермальные процессы, в ходе которых сформировались гигантские кварцевые жилы [Pati et al., 2007; Ramakrishnan, Vaidyanadhan, 2010; Slabunov, Singh, 2019b]. Возраст ранней стадии их формирования оценивается в  $1866 \pm 11$ , а поздней – в  $1779 \pm 43$  млн лет [Slabunov et al., 2017].

## Метаморфизм

Систематические исследования метаморфизма пород кратона не проводились, изучены лишь отдельные участки. Имеются данные о палеоархейском (более 3,2 млрд лет) метаморфизме пород Бунделкхандского гнейсового комплекса [Singh, Dwivedi, 2009; Singh, 2012] высокой степени. Оценки РТ-условий для гранат-силлиманит-биотитовых и гранат-амфибол-биотитовых гнейсов по данным этих авторов составляют  $T - 618\text{--}655$  °C,  $P -$

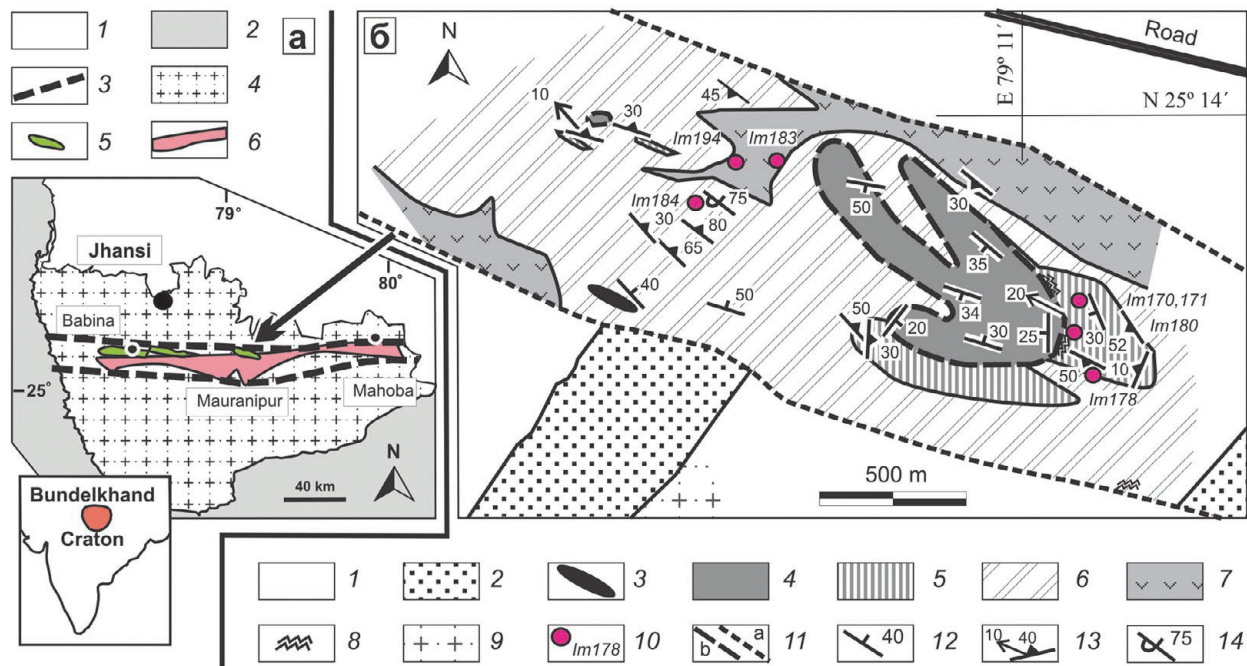


Рис. 1. а – схема расположения Центрального террейна Бабина – Махоба:

1 – аллювиальные отложения; 2 – виндхуанский комплекс; 3 – границы террейнов; 4 – бунделкхандские гранитоиды; 5 – зеленокаменные комплексы; 6 – ТТГ-комплексы;

б – схема геологического строения зеленокаменного пояса в р-не Мауранипур Бунделкхандского кратона [по: Slabunov, Singh, 2019в с упрощениями]:

1 – аллювиальные отложения; 2 – кварцевые жилы (риффы) (1,9–1,8 млрд лет); 3–7 – зеленокаменный комплекс: 3 – дайка кислых пород (2,56 млрд лет), 4 – полосчатые кварциты (BIF), 5 – кислые метавулканы (2,81 млрд лет), 6 – метабазальты (местами с реликтами шаровой текстуры), 7 – метасоматические породы (около 2,7 млрд лет); 8 – метасоматические породы (около 2,7 млрд лет); 9 – гранитоиды (3,55–2,50 млрд лет); 10 – точки отбора образцов и их номер; 11 – предполагаемые разломы (а) и надвиги (б); 12–14 – элементы залегания: 12 – полосчатости, 13 – сланцеватости и линейности, 14 – опрокинутое залегание

Fig. 1. a – location of the Babina – Mahoba Central Terrain:

1 – alluvial deposits; 2 – Vindhyan complex; 3 – boundaries of the terrains; 4 – Bundelkhand granitoids; 5 – greenstone complexes; 6 – TTG complexes;

б – scheme of the geological structure of the Mauranipur greenstone belt, Bundelkhand Craton after [Slabunov, Singh, 2019в, with simplifications]:

1 – alluvial deposits; 2 – quartz veins (reefs) (1.9–1.8 Ga); 3–7 – greenstone complex: 3 – felsic dike (2.56 Ga), 4 – banded iron formation (BIF), 5 – felsic metavolcanic rocks (2.81 Ga), 6 – metabasalts (in some cases with relics of pillow structure), 7 – meta-ultramafics and high-Mg basalts; 8 – metasomatic rocks (about 2.7 Ga); 9 – granitoids (3.55–2.50 Ga); 10 – sampling points with number; 11 – alleged faults (a) and thrusts (b); 12 – bedding, 13 – foliation and linearity, 14 – overturned bedding

4,9–5,4 кбар и  $T = 710\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 3,9\text{--}4,3$  кбар соответственно. Определены параметры метаморфизма в палеоархейских (3,5–3,4 млрд лет) ТТГ-гнейсах района Сукванской дамбы (Sukwan Dam), лежащие в пределах  $T = 630\text{--}720\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 6,5\text{--}8,5$  кбар [Nasipuri et al., 2019]. В борту Центрально-Бунделкхандского террейна, в линзе высокомагнезиальных корундсодержащих флогопит-хлоритовых сланцев были установлены метаморфические преобразования в условиях эклогитовой фации ( $>18$  кбар), возраст которых оценивается в  $2780 \pm 64$  млн лет [Saha et al., 2011]. Для метавулканических зеленокаменных комплексов кратона по данным [Singh, 2012] предполагался метаморфизм низких

ступеней, времени проявления 3,2–2,6 млрд лет, в РТ-условиях  $480\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 4–5 кбар (рис. 2).

В породах р-на Мауранипур был определен возраст кислых вулканических и метасоматических пород, что позволяет значительно сузить возрастные рамки эпигенетических процессов [Slabunov, Singh, 2019b] и установить их последовательность [Сибелев и др., 2019].

Пиковые условия метаморфизма раннего этапа достигали амфиболитовой фации повышенных давлений (рис. 2):  $T = 586\text{--}679\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 6,7\text{--}7,2$  кбар [Сибелев и др., 2019], при общей невысокой интенсивности переработки пород комплекса. Время проявления этой стадии ог-

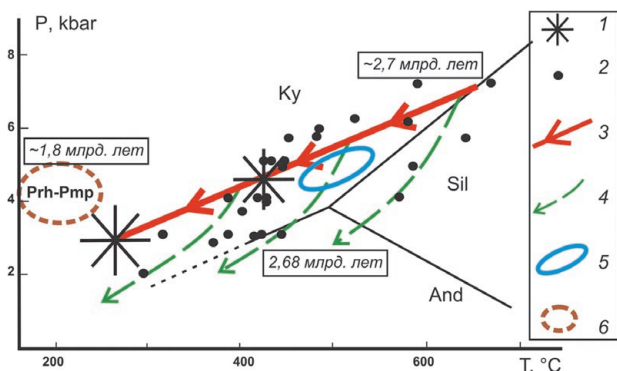


Рис. 2. Расчетные значения палеотемператур и палеодавлений и предполагаемые тренды изохимического метаморфизма и метасоматоза в изученных метавулканитах района Мауранипур:

1, 2 – фигуративные точки РТ-параметров, полученные с помощью программы TWQ [Berman, 1991; БД 1992 TWQ\_Comb, TWQ\_View Д. В. Доливо-Добровольский] (1) и «классических» методов [Wells, 1979; Powell, 1985; Blundy, Holland, 1990; Fonarev et al., 1991; Schmidt, 1991 et al.] (2); 3, 4 – предполагаемые РТ-тренды изменения условий метаморфизма (3) и метасоматоза (4); 5 – область РТ-параметров метаморфизма в метасадках и метавулканитах ЦБЗК [по: Singh, 2012]; 6 – предполагаемые РТ-параметры устойчивости Prh-Pmp минеральных ассоциаций

Fig. 2. Calculated values of paleotemperatures and paleopressures and expected trends of isochemical metamorphism and metasomatism in the studied metavolcanics of the Mauranipur area:

1, 2 – imaging points of PT-parameters obtained using the TWQ program [Berman, 1991; DB 1992 Dolivo-Dobrovolsky D. V. TWQ\_Comb, TWQ\_View] (1) and 'classical' methods [Wells, 1979; Powell, 1985; Blundy, Holland, 1990; Fonarev et al., 1991; Schmidt, 1991 et al.] (2); 3, 4 – expected PT trends of changes in the conditions of metamorphism (3) and metasomatism (4); 5 – area of the RT parameters of metamorphism in metasediments and metavolcanics of the Central Bundelkhand greenstone complex after [Singh, 2012]; 6 – expected PT-parameters of Prh-Pmp mineral associations stability

раничено рамками возраста кислых вулканитов и метасоматитов.

Последующие наиболее интенсивные преобразования связаны с регрессивным метаморфизмом и сопряженным с ним метасоматозом. Метасоматиты пространственно приурочены к зонам разломов или тектонических контактов пород, то есть к зонам разгрузки литостатического давления, и в низкотемпературной области отвечают пропилитовой фации метасоматоза. Для «классических» пропилитов [Русинов, 1972; Метасоматизм..., 1998] характерны  $T = 200\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  при низких давлениях почти гипабиссального уровня.

Пренит-пумпеллиитовая фация метаморфизма – поздний этап преобразований и, вероятно, протекал параллельно со становлением гидротермальных кварцевых жил (рифов). Парагенезисы пренит-пумпеллиитовой фации района Мауранипур имеют свои отличитель-

ные особенности: в метавулканитах отсутствуют цеолиты и устойчив гроссуляр, что, наряду с барофильностью пумпеллиита, свидетельствует о преобразованиях в наиболее высокобарических областях фации ( $T = 150\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 3\text{--}5\text{ кбар}$ ). Геотермический градиент составляет  $\sim 5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

## Методика работ

Поскольку главной целью исследований было изучение процессов метаморфизма и метасоматоза, при полевых работах отбирались образцы наиболее измененных пород, в первую очередь – гранатсодержащих. Проблема выделения равновесных парагенезисов решалась с помощью детальных петрографических исследований и парагенетического анализа, с применением диаграмм состав-парагенезис, построенных на основе реальных химических составов минералов. Анализ химического состава минералов выполнен в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (Петрозаводск) на сканирующем растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II LSH с приставкой INCA Emergey 350, совмещенной с микроанализатором (аналитик А. Н. Терновой).

## Гранатсодержащие породы и их минеральные парагенезисы

Гранат зафиксирован в двух типах пород: в метамафит-ультрамафитах и кислых метавулканитах.

Минеральные ассоциации этих пород многофазны, зачастую метастабильны и представлены реликтовыми (первичными), метаморфическими и метасоматическими минералами. Почти все они сохраняются до последних стадий бластеза, за исключением гипотетического биотита (в чистом виде не обнаружен) и плагиоклаза, который по мере увеличения интенсивности наложенных процессов становится более кислым и почти полностью исчезает.

*Кислые метавулканиты* – изначально породы аллотриоморфнозернистой (аплитовой), участками – порфирированной микроструктуры, характеризующейся наличием вкрапленников плагиоклаза и поликристаллического (перекристаллизованного) кварца, размером до первых мм, на фоне тонкозернистой (0,05–0,15 мм) основной массы кварц-полевошпатового ( $\pm\text{Ampr}^1$ , Ms, Chl, Mag) состава. Под воздействием наложенных процессов первичные структурно-текстурные особенности пород затушевываются

<sup>1</sup> Символы минералов даны по: [Donna, Bernard, 2010].

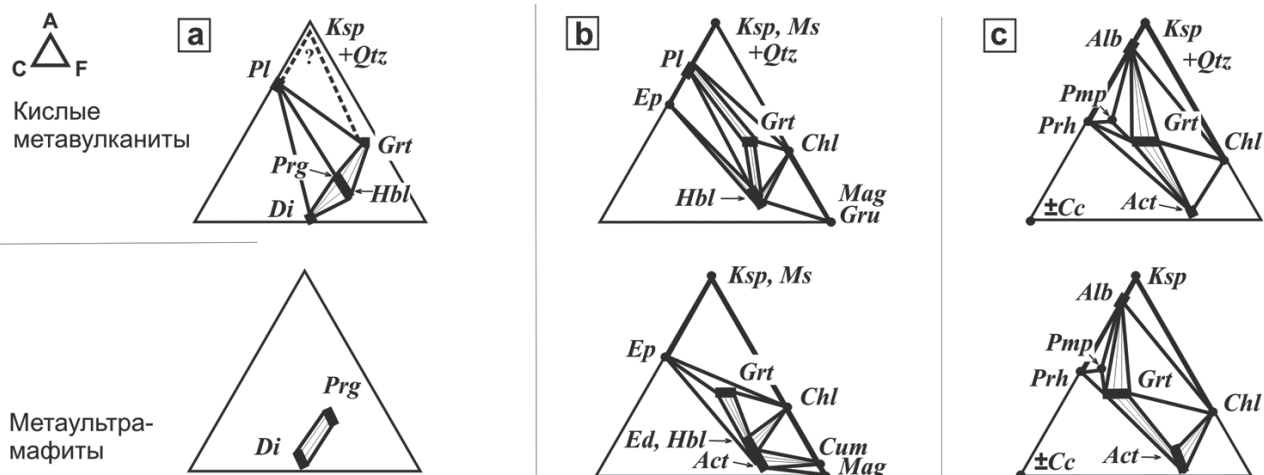


Рис. 3. Диаграммы состав-парагенезис для кислых метавулканидов и метаяльтрамафитов в координатах А (Al) – С (Ca) – F (Fe+Mg+Mn): а – пик метаморфизма (амфиболитовая фация); б – средняя ступень (~ эпидот-амфиболитовая фация); с – низкая ступень (~ зеленосланцевая, пренит-пумпеллиитовая фации)

Fig. 3. Diagrams of composition-parageneses for felsic metavolcanic rocks and meta-ultramafics in the coordinates A (Al) – C (Ca) – F (Fe+Mg+Mn): a – peak metamorphism (amphibolite facies); б – middle stage (~ epidote-amphibolite facies); с – low stage (~ greenschist, prehnite-pumpellyite facies)

и описываются в терминах метаморфической петрографии как гнейсы нематогранобластовой, порфиروгранобластовой структур, с плоскопараллельной или полосчатой текстурой.

Минеральный состав кислых метавулканидов (рис. 3) зависит не столько от вариаций состава протолита, сколько от характера и интенсивности наложенных, в особенности метасоматических, преобразований.

Присутствие в породах низкокремнистого амфибола (Prg, Ts) приводит к запрету парагенезиса клинопироксена с гранатом (рис. 3, а), а наличие моновариантного равновесия гранат – кальциевый амфибол исключает парагенетичность хлорита, рудных минералов и грюнерита с эпидотом, пренитом и пумпеллиитом (рис. 3, в, с).

**Метаультрамафиты** представлены измененными оливковыми клинопироксенитами [Malviya et al., 2006; Singh, 2012], клинопироксенитами и возможно – вебстеритами (в одном из образцов зафиксированы реликты ортопироксена и куммингтонитовые псевдоморфозы по нему). В отобранных образцах оливин не был зафиксирован, но отмечены псевдоморфозы агрегатов рудных минералов округлой формы, которые могли быть сформированы по оливину.

Для метаклинопироксенитов характерна крупнозернистая (3–5 мм) панидиоморфнозернистая структура, массивная текстура. Помимо амфибола в них кристаллизуются гранат, хлорит, клиноцоизит и другие вторичные минералы (рис. 2, в). Породы приобретают вначале

пойкилитовую или мозаичную, затем – нематобластовую и нематогранобластовую структуру. При интенсивных, относительно низкотемпературных преобразованиях развиваются куммингтонит, амфиболы актинолитового ряда и, порой в значительных количествах, хлорит. Производные такого процесса – среднезернистые актинолититы и гранат-амфиболовые хлорититы.

Минеральные парагенезисы заключительных (низкотемпературных) стадий наложенных преобразований метаяльтрамафитов (см. рис. 2, с) во многом схожи с подобными парагенезисами кислых метавулканидов, что свидетельствует о значительном влиянии процессов метасоматического характера, которому подвержены и те и другие породы. В метаяльтрамафитах отсутствуют кварц и плагиоклаз, а железомagneзиальные минералы обогащены магнием, за исключением граната, который в этих породах обогащен кальцием, и это позволяет предположить, что он начал кристаллизоваться на более низких ступенях метаморфизма относительно граната кислых метавулканидов. Отсутствие плагиоклаза делает возможным парагенезис эпидота с гранатом, а высокая кальциевость граната на самых низких ступенях метаморфизма исключает парагенетичность актинолита не только с пумпеллиитом, но и с пренитом: в гранат-амфиболовых хлорититах и пренит и пумпеллиит отсутствуют.

Таким образом, ранние метаморфические парагенезисы представлены: Grt-Prg-Pl; Cpx-Prg-Pl; Cpx-Grt-Pl; Cpx-Prg ( $\pm$ Ksp,  $\pm$ Qtz,  $\pm$ Mag).

Регрессивная стадия данного этапа метаморфизма прослеживается последовательной сменой парагенезисов: Grt-Pl-Hbl; Grt-Chl-(Hbl-Act); Grt-(Zo-Czo) – (Hbl-Act); Grt-Chl-Pl ( $\pm Ksp$ ,  $\pm Qz$ ,  $\pm Mag$ ,  $\pm Ms$ ). При этом изменяется состав гранатов (в них снижается магнезиальность и увеличивается доля Grs-минала), амфиболов (увеличивается содержание кремнезема, вплоть до Act).

С регрессивной стадией этого этапа метаморфизма неразрывно связаны метасоматические процессы. Наиболее высокотемпературные парагенезисы метасоматитов – Chl-(Gru-Cum) – Act; Grt-Chl-(Hbl-Act) сменяются относительно среднетемпературными – Grt-Ep-Act, Ep-Pl-Act, Ep-Act-Alb и низкотемпературными – Ep-Chl-Alb, Alb-Cc-Chl. Средне- и низкотемпературные метасоматиты соответствуют пропилитам [Русинов, 1972; Метасоматизм..., 1998].

Поздняя стадия (этап?) метаморфических преобразований метавулканитов протекает в условиях пренит-пумпеллиитовой фации. Парагенезисы этой стадии: Prh-Pmp-Alb; Prh-Pmp-Grs; Pmp-Grs-Alb; Prh-Cc-Act; Prh-Grs-Cc.

### **Гранаты: особенности химического состава и внутреннего строения**

Макроскопически гранаты ЦБЗК окрашены в различные цвета: светло-розовые, малиново-розовые, грязно-коричневые, черные. Связи окраски граната с его химическим составом не выявлено. Размеры зерен редко превышают 1 мм (минеральные агрегаты до 3–5 см [Slabunov, Singh, 2019b]). Количество их невелико и редко превышает 2–3 зерна на шлиф. Гранаты кристаллизуются в виде изометричных, пойкилитовых, нередко футляровидных зерен и обладают заметной анизотропией (просветляются в скрещенных николях), что характерно для гроссуляр-андрадитовых разновидностей этого минерала.

По химическому составу изученные гранаты принадлежат к пиральспитовой (Pir) и частично к уграндитовой (Ugr) серии [Grew et al., 2013] (рис. 4, а). Они характеризуются высоким содержанием спессартинового минала (до 44 %), низким – пироповой компоненты и колоссальными вариациями содержания альмандинового и гроссулярного миналов как в общей выборке, так и в пределах отдельно взятых зерен (табл., рис. 4). В некоторых анализах в небольших количествах фиксируется шорломитовый (до 0,83 %  $TiO_2$ ) и уваровитовый (до 0,16 %  $Cr_2O_3$ ) миналы.

Уникальность гранатов района Мауранипур состоит в том, что их состав закономерно из-

меняется не столько в рамках отдельных серий, сколько «поперек» этих серий – от пиральспитовых разновидностей к уграндитовым. В том направлении, где, казалось бы, за счет разницы в ионных радиусах Ca с одной стороны и Mg,  $Fe^{3+}$  с другой смесимость компонентов должна быть сильно ограничена [Berry et al., 1959] (рис. 4, в).

Для выявления гетерогенности минералов, в частности гранатов, – зональности, неоднородностей концентраций компонентов – существуют методики увеличения контрастности изображений в отраженных электронах за счет увеличения тока катода и в предельном аппаратном контрасте [Перчук, Варламов, 1995], но не всегда операторы электронного микроскопа склонны менять настройки прибора для работы в нестандартных режимах. В случае с гранатами ЦБЗК это и не требуется, поскольку значительные вариации альмандинового и гроссулярного миналов дают высококонтрастные BSE-изображения, в которых можно наблюдать явления, незаметные, например, в гранатах пироп-альмандинового ряда.

Почти все изученные зерна гранатов обладают контрастной зональностью. Ее главные особенности хорошо иллюстрируются на примере обр. IM178 из кислых метавулканитов (рис. 5). В данном образце (шлифе) наблюдается крупное футляровидное зерно граната с корродированными внешними контурами и большим количеством включений, особенно во внутренней своей части. Включения представлены калийшпатом, кварцем, амфиболом, хлоритом, ильменитом и пумпеллиитом. Матрикс неоднороден и выполнен пренитсодержащей кварц-амфибол-полевошпатовой породой (+ Pmp, Ms, Chl, Ilm, Ttn и др.) и кварцем. Гранат разбит трещинками, обладающими преимущественной ориентировкой вкрест простирания полосчатости породы. Трещины сложены хлоритом, калийшпатом, пренитом или кальциевым гранатом (стрингеры). Пренитовые трещинки, в отличие от остальных, секут не только зерно граната, но и матрикс. Ранние, центральные участки граната обогащены пиральспитовыми компонентами и обеднены кальцием (рис. 5). К краевым участкам зерна резко возрастает концентрация кальция при падении содержания остальных компонентов.

Внешние области зерна граната характеризуются зональностью диффузионного типа (рис. 6), с явными признаками коррозии, тогда как внутренние участки «футляра» обладают четкой дискретной ростовой зональностью с «правильными» кристаллографическими очертаниями и контрастными зонами, харак-

Химический состав гранатов Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса

Chemical composition of garnet in the Central Bundelkhand greenstone complex

Sample	IM170		IM170		IM170		IM170		IM170		IM170		IM178		IM178		IM178		IM178				
	3	2	3	5	4	6	4	8	4	9	4	6	6	9	10	6	2	3	2	4	2	5	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	36,65		36,25	36,74	37,94	36,81	37,24	36,12	37,31	37,00	37,04	37,36	36,73	37,30	37,40	37,42							
<b>TiO<sub>2</sub></b>	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							
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,23		19,88	20,15	19,88	20,67	21,09	20,40	20,19	20,44	18,91	21,13	20,58	20,87	21,10	20,81							
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	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							
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	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							
<b>FeO</b>	28,34		27,30	28,24	27,09	28,82	28,56	30,55	29,77	31,40	31,24	13,42	21,47	14,49	10,46	11,25							
<b>MnO</b>	8,54		7,95	8,92	7,93	8,59	7,54	8,07	8,17	7,97	8,08	16,27	16,65	16,73	15,16	16,66							
<b>MgO</b>	0,00		0,73	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	1,41	0,00	1,23	0,81	0,00	0,00							
<b>CaO</b>	6,49		7,22	5,63	6,87	5,28	5,46	4,87	5,54	4,03	3,77	12,47	3,53	10,09	15,97	14,19							
<b>Total</b>	100,25		99,34	99,67	99,71	100,17	100,40	100,01	100,98	100,84	100,45	100,65	100,19	100,29	100,09	100,33							
<b>Si<sup>4+</sup></b>	2,98		2,96	3,01	3,09	3,00	3,01	2,96	3,02	3,01	3,01	2,97	2,98	2,98	2,96	2,97							
<b>Ti<sup>4+</sup></b>	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							
<b>Al<sup>3+</sup></b>	1,94		1,91	1,94	1,91	1,98	2,01	1,97	1,93	1,96	1,81	1,98	1,97	1,96	1,97	1,95							
<b>Cr<sup>3+</sup></b>	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							
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,10		0,17	0,04	0,00	0,02	0,00	0,12	0,04	0,03	0,17	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10							
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	1,83		1,69	1,90	1,85	1,95	1,93	1,97	1,98	2,11	1,95	0,81	1,38	0,89	0,59	0,64							
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	0,59		0,55	0,62	0,55	0,59	0,52	0,56	0,56	0,55	0,56	1,10	1,14	1,13	1,02	1,12							
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,00		0,09	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,15	0,10	0,00	0,00							
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,57		0,63	0,49	0,60	0,46	0,47	0,43	0,48	0,35	0,33	1,06	0,31	0,86	1,36	1,21							
<b>Alm</b>	0,62		0,58	0,63	0,60	0,65	0,65	0,68	0,65	0,70	0,65	0,29	0,47	0,31	0,22	0,23							
<b>Sps</b>	0,19		0,18	0,21	0,19	0,20	0,17	0,18	0,19	0,18	0,19	0,36	0,38	0,37	0,34	0,37							
<b>Prp</b>	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,05	0,03	0,00	0,00							
<b>Grs</b>	0,16		0,16	0,14	0,16	0,15	0,16	0,12	0,12	0,10	0,02	0,34	0,08	0,27	0,43	0,37							
<b>Adr</b>	0,03		0,04	0,03	0,04	0,01	0,00	0,02	0,04	0,02	0,09	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03							
<b>Uv</b>	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							
<b>Shm</b>	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							







Продолжение табл.

Table (continued)

Sample	IM178		IM178		IM178		IM178		IM178		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180										
	3	8	3	9	3	10	4	2	3	4	13	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	3	5	6	7	8		
SiO <sub>2</sub>	36,73	36,74	36,48	36,48	36,82	36,48	36,82	38,50	38,50	38,56	37,07	37,71	37,23	36,97	37,73	37,88	37,88	37,73	36,97	37,23	37,71	37,23	36,97	37,73	37,88	37,88	38,04	38,04	37,58
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,49	0,60	0,26	0,26	0,36	0,50	0,50	0,36	0,26	0,26	0,60	0,26	0,26	0,36	0,50	0,57	0,40	0,40	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,86	20,25	20,85	20,85	20,34	20,85	20,34	20,97	20,97	20,70	19,92	19,00	20,41	19,76	19,93	20,27	20,27	19,93	19,76	20,41	19,00	20,41	19,76	19,93	20,27	19,71	19,89	19,89	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
FeO	18,95	19,36	19,30	19,30	17,53	19,30	17,53	9,68	9,68	10,03	10,84	11,92	13,12	11,38	15,54	10,64	10,64	15,54	11,38	13,12	11,92	13,12	11,38	15,54	10,64	11,74	11,83	11,83	
MnO	18,73	18,13	18,48	18,48	18,65	18,48	18,65	15,53	15,53	14,78	18,93	15,90	17,07	16,77	14,95	16,99	16,99	14,95	16,77	17,07	15,90	17,07	16,77	14,95	16,99	16,36	16,76	16,76	
MgO	1,17	1,26	1,31	1,31	1,13	1,31	1,13	0,00	0,00	0,43	0,02	0,31	0,12	0,13	0,42	0,22	0,22	0,42	0,13	0,12	0,31	0,12	0,13	0,42	0,22	0,03	0,17	0,17	
CaO	3,82	3,57	3,51	3,51	5,70	3,51	5,70	15,65	15,65	15,60	12,87	15,37	12,26	14,63	12,05	14,26	14,26	12,05	14,63	12,26	15,37	12,26	14,63	12,05	14,26	14,53	14,21	14,21	
Total	99,26	99,31	99,92	99,92	100,18	99,92	100,18	100,33	100,33	100,29	100,14	100,81	100,47	99,90	100,98	100,75	100,75	100,98	99,90	100,47	100,81	100,47	99,90	100,98	100,75	100,97	100,83	100,83	
Si <sup>4+</sup>	3,01	3,00	2,96	2,96	2,97	2,96	2,97	3,04	3,04	3,04	2,97	2,99	2,97	2,96	3,00	3,00	3,00	3,00	2,96	2,97	2,99	2,97	2,96	3,00	3,00	3,01	2,98	2,98	
Ti <sup>4+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	
Al <sup>3+</sup>	1,92	1,95	1,99	1,99	1,94	1,99	1,94	1,95	1,95	1,93	1,88	1,78	1,92	1,86	1,87	1,89	1,89	1,87	1,86	1,92	1,78	1,92	1,86	1,87	1,89	1,84	1,86	1,86	
Cr <sup>3+</sup>	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	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>3+</sup>	0,07	0,04	0,08	0,08	0,12	0,08	0,12	0,00	0,00	0,00	0,12	0,17	0,11	0,19	0,10	0,05	0,05	0,10	0,19	0,11	0,17	0,11	0,19	0,10	0,05	0,06	0,13	0,13	
Fe <sup>2+</sup>	1,23	1,28	1,23	1,23	1,07	1,23	1,07	0,64	0,64	0,66	0,61	0,62	0,77	0,57	0,94	0,65	0,65	0,94	0,57	0,77	0,62	0,77	0,57	0,94	0,65	0,71	0,65	0,65	
Mn <sup>2+</sup>	1,30	1,26	1,27	1,27	1,28	1,27	1,28	1,04	1,04	0,99	1,28	1,07	1,15	1,14	1,01	1,14	1,14	1,01	1,14	1,15	1,07	1,15	1,14	1,01	1,14	1,10	1,13	1,13	
Mg <sup>2+</sup>	0,14	0,15	0,16	0,16	0,14	0,16	0,14	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,01	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,05	0,03	0,00	0,02	0,02	
Ca <sup>2+</sup>	0,34	0,31	0,31	0,31	0,49	0,31	0,49	1,32	1,32	1,32	1,10	1,31	1,05	1,25	1,03	1,21	1,21	1,03	1,25	1,05	1,31	1,05	1,25	1,03	1,21	1,23	1,21	1,21	
Alm	0,41	0,43	0,43	0,43	0,37	0,43	0,37	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,26	0,21	0,30	0,20	0,20	0,30	0,21	0,26	0,19	0,26	0,21	0,30	0,20	0,21	0,21	0,21	
Sps	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,35	0,35	0,34	0,43	0,36	0,38	0,38	0,34	0,38	0,38	0,34	0,38	0,38	0,36	0,38	0,38	0,34	0,38	0,37	0,38	0,38	
Prp	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	
Grs	0,07	0,08	0,10	0,10	0,13	0,10	0,13	0,42	0,42	0,41	0,31	0,33	0,31	0,35	0,28	0,35	0,35	0,28	0,35	0,31	0,33	0,31	0,35	0,28	0,35	0,34	0,33	0,33	
Adr	0,04	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,09	0,03	0,06	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03	0,09	0,03	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06	0,06	
Uv	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Shm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	

Продолжение табл.  
Table (continued)

Sample	IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM180		IM183		
	3	9	3	10	3	11	3	12	3	13	3	14	3	15	5	6	7	8	13	13	14	3	3
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37,63		37,78	37,58	37,47	37,29	37,51	36,84	37,64	37,27	37,72	36,27	36,61	36,27	36,61	36,27	36,61	36,61	36,61	36,61	37,57	37,03	37,14
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,21		0,41	0,27	0,29	0,00	0,00	0,57	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,35	0,09
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,09		19,57	19,85	19,73	19,86	20,28	19,37	20,30	18,67	19,91	19,75	19,54	19,75	19,54	19,75	19,54	19,54	19,54	19,54	19,02	20,86	20,76
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>FeO</b>	11,07		11,69	11,85	12,81	12,27	11,91	11,81	14,12	11,60	13,00	14,15	15,11	14,15	15,11	14,15	14,72	14,72	14,72	14,72	12,87	16,73	19,03
<b>MnO</b>	16,69		16,56	16,42	16,75	19,97	18,10	16,39	14,47	16,98	15,54	13,92	14,72	13,92	14,72	13,92	14,67	14,67	14,67	14,67	14,67	16,76	13,98
<b>MgO</b>	0,07		0,17	0,12	0,21	0,21	0,13	0,09	0,41	0,31	0,29	0,18	0,38	0,18	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	3,23
<b>CaO</b>	14,88		14,53	14,53	13,13	11,03	12,83	14,33	12,92	14,55	14,19	13,86	12,43	13,86	12,43	15,41	15,41	15,41	15,41	15,41	15,41	5,69	5,15
<b>Total</b>	100,63		100,71	100,62	100,39	100,63	100,76	99,39	100,32	99,38	100,65	98,26	99,03	98,26	99,03	100,14	100,14	100,14	100,14	100,14	100,14	100,12	99,39
<b>Si<sup>4+</sup></b>	2,98		3,00	2,98	2,99	2,98	2,98	2,97	3,00	3,00	2,99	2,95	2,96	2,95	2,96	3,00	2,96	2,96	2,96	2,96	3,00	2,96	2,98
<b>Ti<sup>4+</sup></b>	0,01		0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
<b>Al<sup>3+</sup></b>	1,88		1,83	1,86	1,86	1,87	1,90	1,84	1,91	1,77	1,86	1,89	1,86	1,89	1,86	1,79	1,96	1,86	1,86	1,86	1,79	1,96	1,96
<b>Cr<sup>3+</sup></b>	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,13		0,12	0,14	0,13	0,16	0,14	0,16	0,04	0,23	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	0,13	0,08	0,20	0,20	0,20	0,13	0,08	0,07
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0,60		0,65	0,65	0,73	0,66	0,65	0,64	0,90	0,55	0,71	0,76	0,83	0,76	0,83	0,73	1,04	0,83	0,83	0,73	0,73	1,04	1,21
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	1,12		1,11	1,10	1,13	1,35	1,22	1,12	0,98	1,16	1,04	0,96	1,01	0,96	1,01	0,99	1,13	1,01	1,01	0,99	0,99	1,13	0,95
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,01		0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,05	0,04	0,03	0,02	0,05	0,02	0,05	0,00	0,32	0,05	0,05	0,00	0,00	0,32	0,39
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	1,26		1,24	1,24	1,12	0,95	1,09	1,24	1,10	1,25	1,21	1,21	1,08	1,21	1,08	1,32	0,49	1,08	1,08	1,32	1,32	0,49	0,44
<b>Alm</b>	0,20		0,20	0,21	0,24	0,23	0,23	0,21	0,28	0,18	0,24	0,28	0,30	0,28	0,30	0,22	0,36	0,30	0,30	0,22	0,22	0,36	0,41
<b>Sps</b>	0,37		0,37	0,37	0,38	0,45	0,40	0,37	0,33	0,39	0,35	0,31	0,33	0,31	0,33	0,34	0,38	0,33	0,33	0,34	0,34	0,38	0,31
<b>Prp</b>	0,00		0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,11	0,02	0,02	0,00	0,00	0,11	0,13
<b>Grs</b>	0,36		0,33	0,34	0,30	0,25	0,31	0,33	0,32	0,30	0,33	0,34	0,29	0,34	0,29	0,34	0,14	0,29	0,29	0,34	0,34	0,14	0,13
<b>Adr</b>	0,06		0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,03	0,11	0,07	0,05	0,06	0,05	0,06	0,09	0,01	0,06	0,06	0,09	0,09	0,01	0,02
<b>Uv</b>	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Shm</b>	0,01		0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00

Окончание табл.

Table (continued)

Sample	IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		IM183		
	3	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Field	13	1	2	3	4	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Spot	13	1	2	3	4	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
SiO <sub>2</sub>	38,42	37,28	37,41	37,17	36,29	37,65	37,81	37,97	37,67	38,37	37,69	37,54	37,78	37,55	37,26						
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,06	0,09	0,00	0,21	0,00	0,18	0,09	0,22	0,27						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,90	21,18	21,14	20,47	20,42	21,04	21,33	21,28	20,68	21,11	21,12	21,36	20,71	20,40	21,08						
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,09						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,09						
FeO	17,30	17,63	17,40	17,67	17,84	17,13	18,90	18,79	18,18	17,80	17,52	17,25	17,19	17,34	17,34						
MnO	15,89	17,16	17,38	16,46	15,82	15,82	13,66	14,82	15,13	14,32	15,37	15,75	15,31	16,14	16,67						
MgO	2,59	2,75	2,86	2,90	2,86	2,73	4,02	3,35	3,20	3,32	3,25	2,71	2,80	2,97	2,76						
CaO	5,32	4,73	4,82	5,43	5,96	6,26	4,73	4,24	4,90	5,35	5,32	5,70	6,17	5,27	4,72						
Total	100,42	100,73	101,01	100,10	99,18	100,82	100,51	100,54	99,76	100,47	100,27	100,49	100,09	100,07	100,27						
Si <sup>4+</sup>	3,06	2,96	2,96	2,97	2,92	2,98	2,98	3,01	3,01	3,04	2,99	2,98	3,01	3,00	2,97						
Ti <sup>4+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02						
Al <sup>3+</sup>	1,96	1,98	1,97	1,93	1,94	1,96	1,98	1,99	1,95	1,97	1,98	2,00	1,94	1,92	1,98						
Cr <sup>3+</sup>	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	0,01	0,01						
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,09	0,10	0,13	0,22	0,06	0,05	0,00	0,03	0,00	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03						
Fe <sup>2+</sup>	1,15	1,08	1,05	1,05	0,99	1,08	1,20	1,25	1,19	1,18	1,12	1,13	1,12	1,12	1,13						
Mn <sup>2+</sup>	1,07	1,15	1,17	1,11	1,08	1,06	0,91	1,00	1,02	0,96	1,03	1,06	1,03	1,09	1,13						
Mg <sup>2+</sup>	0,31	0,33	0,34	0,35	0,34	0,32	0,47	0,40	0,38	0,39	0,38	0,32	0,33	0,35	0,33						
Ca <sup>2+</sup>	0,45	0,40	0,41	0,46	0,51	0,53	0,40	0,36	0,42	0,45	0,45	0,48	0,53	0,45	0,40						
Alm	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36	0,41	0,41	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37	0,36	0,38						
Sps	0,36	0,38	0,38	0,37	0,35	0,35	0,30	0,33	0,34	0,33	0,34	0,35	0,35	0,37	0,38						
Prp	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16	0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	0,11	0,12	0,11						
Grs	0,13	0,12	0,12	0,12	0,14	0,16	0,12	0,11	0,11	0,14	0,14	0,16	0,15	0,11	0,12						
Adr	0,02	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,00						
Uv	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						
Shm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01						

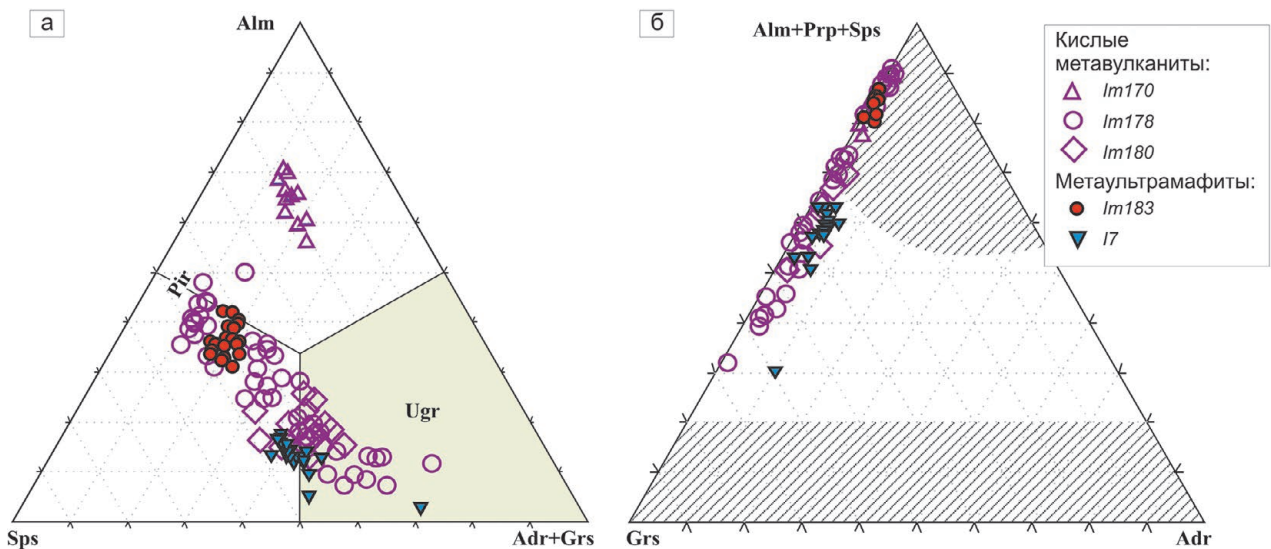


Рис. 4. Компонентный (минальный) состав проанализированных гранатов из пород ЦБЗК Бунделкхандского кратона: а – в координатах спессартин (Sps) – альмандин (Alm) – андрадит+гроссуляра (Adr+Grs), с выделенными полями пиральспитовой (Pir) и унграндитовой (Ung) серий [Grew et al., 2013]; б – в координатах Adr-(Alm+Prp+Sps) – Grs, где показаны поля устойчивости природных гранатов (заштрихованные области) в данных сериях [Berry et al., 1959]

Fig. 4. Component (minal) composition of the analyzed garnet from the rocks the Central Bundelkhand greenstone complex, Bundelkhand Craton: a – in the coordinates spessartine (Sps) – almandine (Alm) – andradite+grossular (Adr+Grs), with selected fields of the pyralspite (Pir) and ungrandite (Ung) series [Grew et al., 2013]; b – in the coordinates Adr-(Alm+Prp+Sps) – Grs, where the stability fields of natural garnets (shaded areas) in these series are shown [Berry et al., 1959]

теризующимися резким изменением состава и границами зон, согласными с границей граната с внутрифулярным матриксом. Складывается впечатление, что гранат рос от периферии к центру. Однако на распределение химических компонентов (по профилю) тип зональности никак не сказывается – общая зональность симметрична (см. рис. 5).

В изученных гранатах наблюдается тенденция к смене характера соотношений главных компонентов в различных зонах зерен. В центральных, наиболее высокотемпературных зонах при низких концентрациях и незначительных колебаниях CaO отмечается обратная корреляция количеств пиропового и альмандинового миналов, имеющих регрессивную направленность (падение MgO и увеличение FeO). Спессартин здесь ведет себя закономерно. В промежуточных и особенно краевых зонах при резком увеличении содержания гроссулярового минала и MgO, и FeO, и порой MnO имеют прямую корреляцию друг с другом и содержания их падают, компенсируя увеличение CaO.

На BSE-изображениях отчетливо выделяются три зоны (рис. 7) с четкими границами. На профилях концентрационного распределения компонентов эти границы более широкие, нежели на снимках, за счет влияния диффузионных про-

цессов, не отображающихся на снимках. На границах зон нередко наблюдаются более темные области – «межзонные аномалии» (рис. 7, а), характеризующиеся более высоким содержанием гроссулярового минала и более низким – альмандинового относительно содержания этих компонентов во вмещающей их зоне.

Те же три зоны можно наблюдать не только в целом по гранату, но и на участках с дефектами зерна в его периферийной корродированной части (рис. 7, б). Такая зональность, по сути, может интерпретироваться как гигантский двойной стрингер – залеченная поздними генерациями граната трещина.

Наибольшее количество стрингеров рассекает центральные части зерна, но некоторые из них трассируются в промежуточные зоны (см. рис. 6). В каймах стрингеры пропадают или не видны, поскольку компонентный состав граната центральной части стрингеров аналогичен составу граната промежуточных или краевых зон. Профильное распределение компонентов в данных образованиях аналогично распределению компонентов по зонам (рис. 8). Эти наблюдения свидетельствуют, что формирование стрингеров протекало на относительно ранних стадиях бластеза, одновременно с ростом граната, и носило регрессивную направленность.

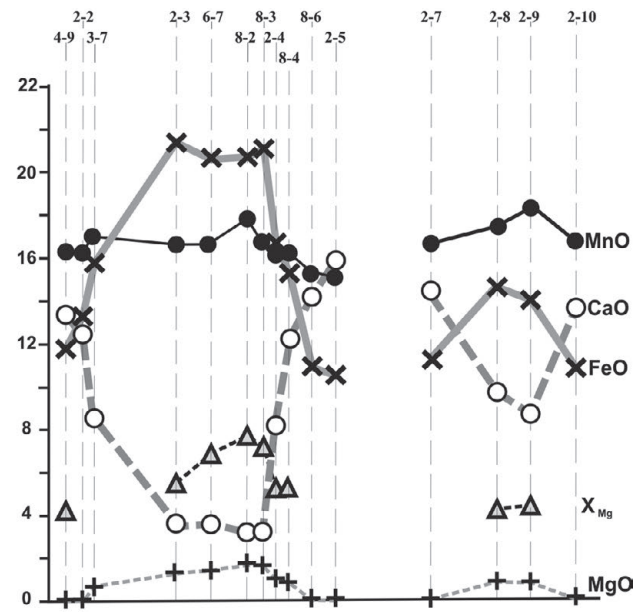
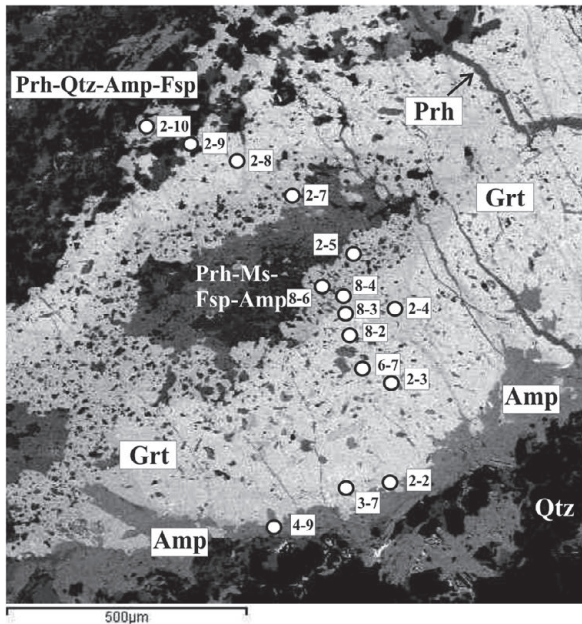


Рис. 5. Микрофото (в отраженных электронах) крупного футляровидного зерна граната (обр. IM178) с точками микрозондового анализа и профилями изменения главных показателей химического состава (химические анализы нормированы к 100 %)

Fig. 5. A microphoto (in reflected electrons) of a large boxy garnet grain (sample IM178) with microprobe analysis points and profiles of changes in the main indicators of chemical composition (the chemical analyzes are normalized to 100 %)

По характеру кривых концентрационного распределения компонентов на профилях через стрингеры, контакты зон или включений граната в гранате, зная температуру метаморфизма на данной стадии и коэффициенты диффузии компонентов, можно рассчитать продолжительность (хронометрию) метаморфического процесса [Перчук, 2003]. В случае с рассматриваемыми процессами эта задача не представляется актуальной, но судя по «сглаженности» профилей содержаний компонентов, можно заключить, что гранаты длительное время после формирования стрингеров подвергались термальному воздействию.

Характерная черта всех изученных зерен гранатов – наличие большого количества включений различных минералов (рис. 9), в том числе включений, выполненных кальциевым гранатом и даже пумпеллиитом, температурная область устойчивости которого ниже устойчивости пиральспитового граната, где он зафиксирован. Минеральный состав включений подчиняется зональности (рис. 9, а). В большинстве проанализированных гранатовых зерен, в которых присутствует зональность, центральные зоны содержат включения хлорита, эпидота, апатита и граната гроссулярового ряда. Краевые зоны зерен содержат преимущественно калийшпат, кварц, иногда актинолит. Промежуточные зоны относительно маломощные, количество вклю-

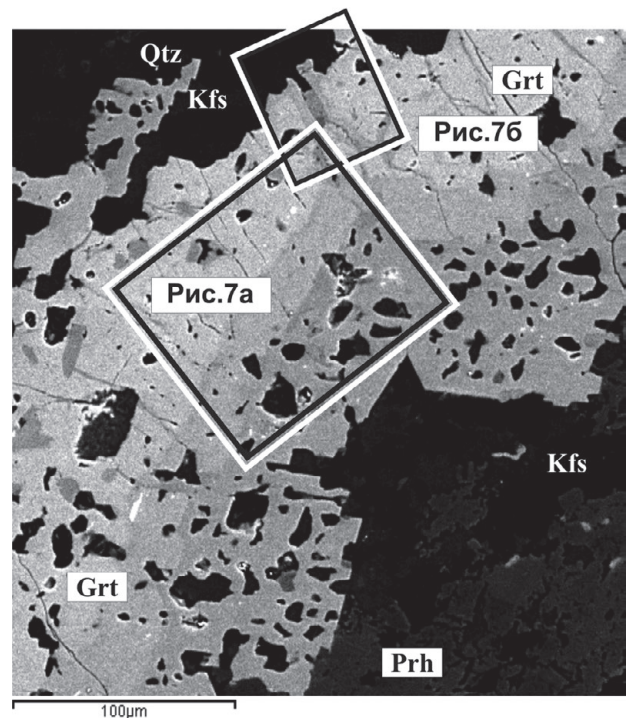


Рис. 6. Микрофото (в отраженных электронах) фрагмента зерна граната с ростовым (к юго-востоку) и диффузионным (к северо-западу) типами зональности. Прямоугольниками отмечены участки более детальной съемки (см. рис. 7)

Fig. 6. A microphoto (in reflected electrons) of a fragment of a garnet grain with growth (to the south-east) and diffusion (to the north-west) types of zoning. Rectangles indicate the areas of more detailed shooting (see Fig. 7)

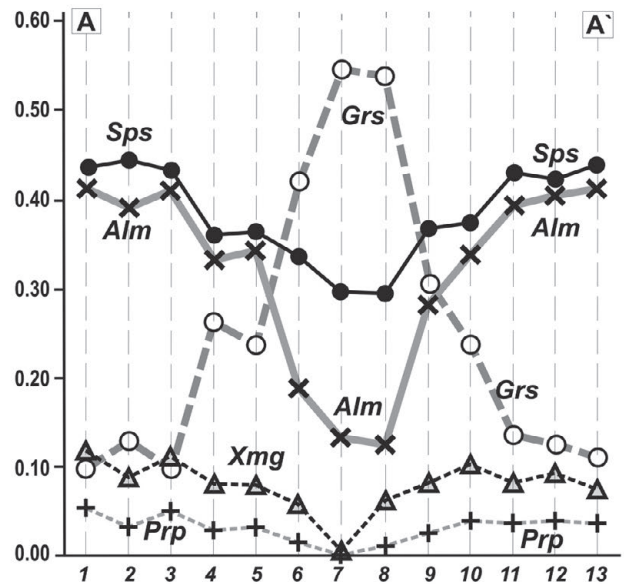
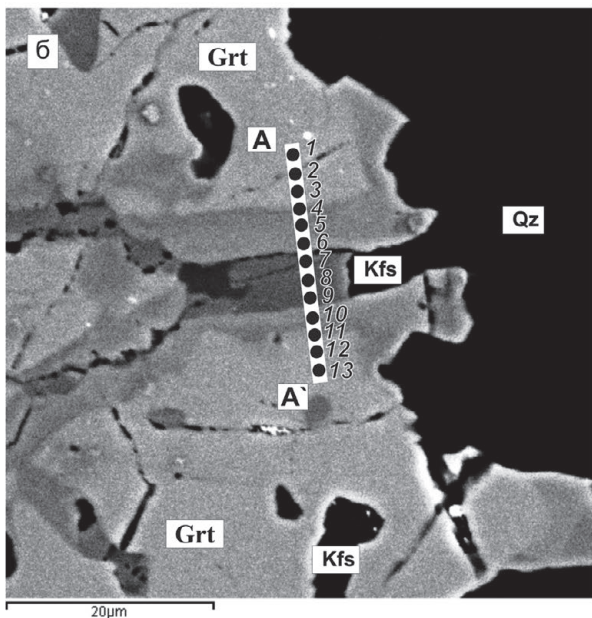
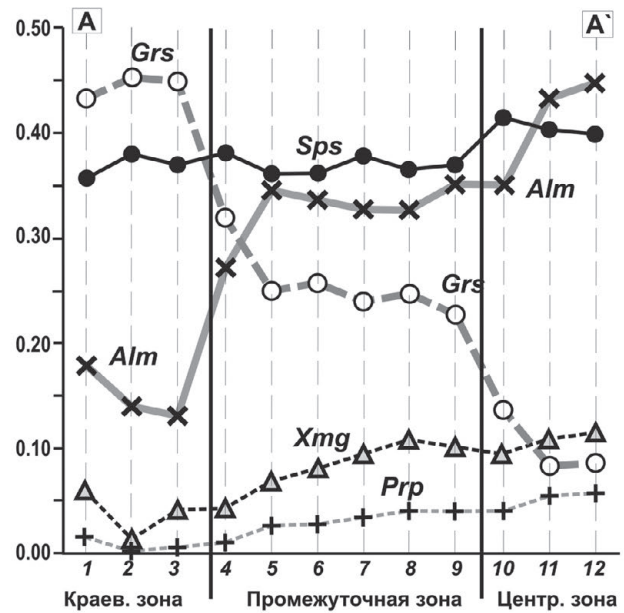
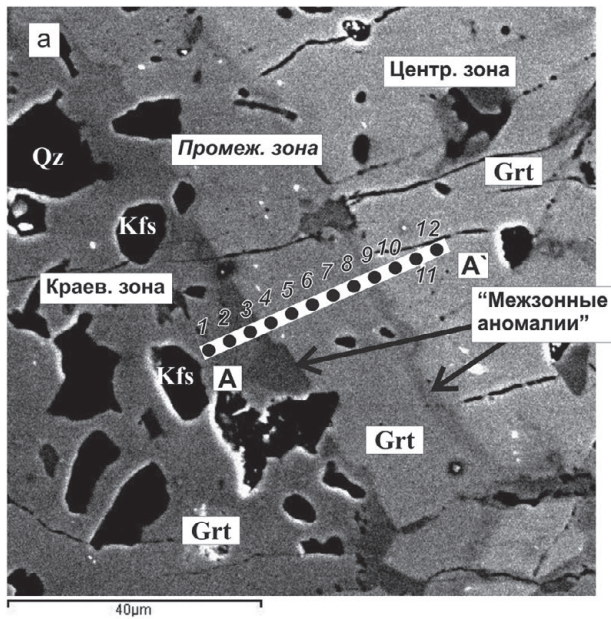


Рис. 7. Микрофото (в отраженных электронах) фрагментов зерен граната и профили концентрационного распределения главных показателей состава: а – с ростовой зональностью и «межзонными аномалиями»; б – со стрингероподобной зональностью на периферийном участке зерна

Fig. 7. Microphotos (in reflected electrons) of garnet grains fragments and concentration distribution profiles of the main composition indicators: а – with growth zoning and “interzonal anomalies”; б – with stringer-like zoning in the peripheral area of a grain

чений в них заметно меньше и в проанализированных точках они представлены кварцем и хлоритом. Интересно, что наиболее кальциевые гранаты отмечены именно во включениях, а не в каймах, которые часто корродированы.

### Обсуждение результатов

Во многих изученных зернах граната метавулканитов ЦБЗК зафиксирована четкая ди-

скретная зональность, выраженная главным образом в падении содержания FeO и увеличении содержания CaO от центра к краю зерен. Зоны контрастны и имеют четкие границы с резкими перепадами содержания этих компонентов, что свидетельствует о резкой смене режима эпигенетических процессов. Зональность подчеркивается минеральным составом включений, подчиняющихся закономерностям кристаллизации парагенезисов, соответствующим

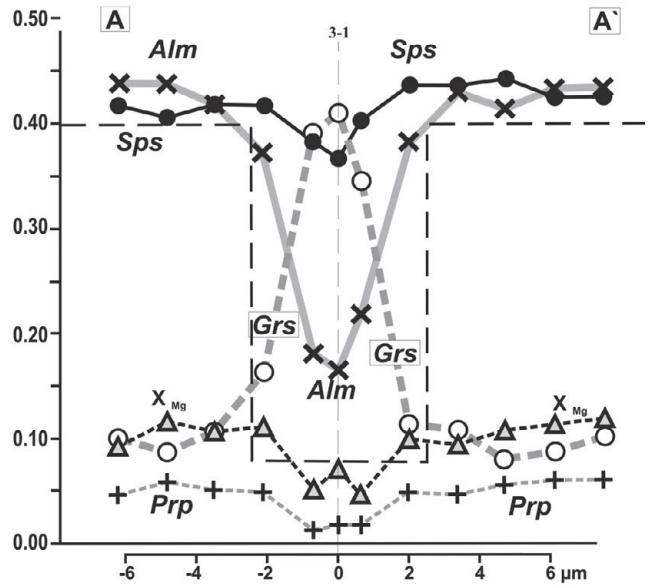
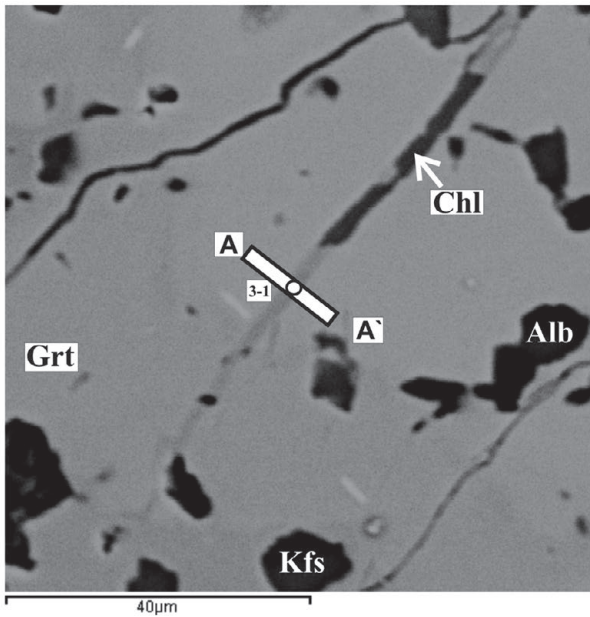


Рис. 8. Микрофото (в отраженных электронах) участка зерна граната со стрингерами и сканированный микрозондовый профиль через один из них, отражающий резкий градиент содержаний главных компонентов (т. 3-1 взята отдельно от сканированного профиля в центре стрингера). Прерывистой линией показана ось стрингера, а ломаной пунктирной линией – профиль первичной трещины

Fig. 8. A microphoto (in reflected electrons) of a garnet grain section with stringers and a scanned microprobe profile through one of them, reflecting a sharp gradient in the contents of the main components (t. 3-1 is taken separately from the scanned profile in the center of the stringer). The dashed line shows the axis of the stringer, and the broken dashed line shows the profile of the primary crack

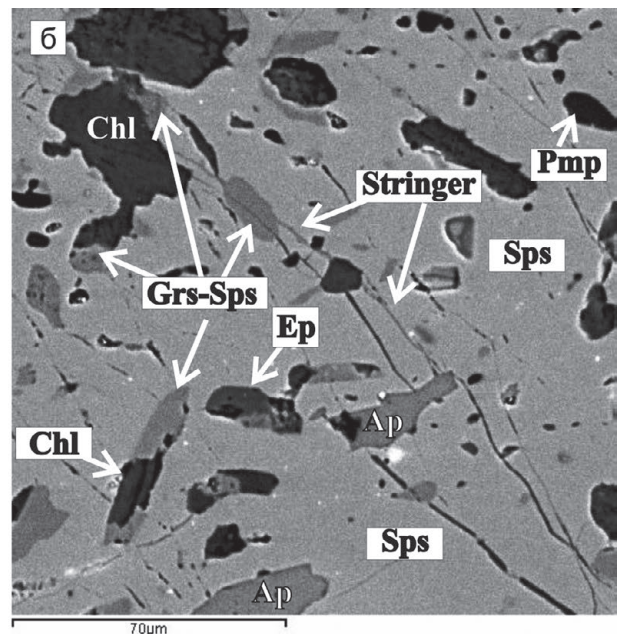
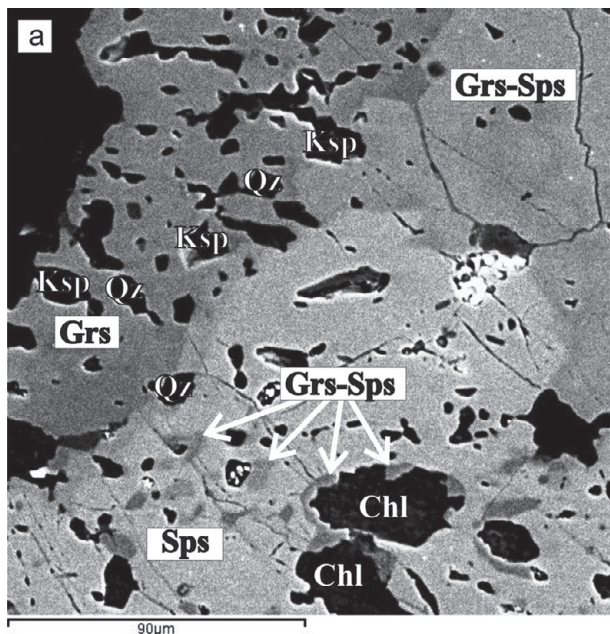


Рис. 9. Микрофото (в отраженных электронах) фрагментов зерен граната: а – иллюстрирующих изменение минерального состава включений в разных зонах, б – процессы псевдоморфного замещения включений хлорита и эпидота более поздними фазами

Fig. 9. Microphotos (in reflected electrons) of garnet grains fragments: а – illustrating the change in the mineral composition of inclusions in different zones, б – processes of pseudomorphic replacement of chlorite and epidote inclusions by later phases



щих термодинамическим параметрам, при которых эти зоны формировались. По количеству зон (3) можно судить по крайней мере о двух изменениях параметров наложенных преобразований. Центральные зоны гранатов (в зернах, где они есть и по составу отвечают соответствующим критериям) формировались в условиях метаморфизма амфиболитовой фации, с регрессивной внутризонной последовательностью изменений химического состава (падение пироповой составляющей и увеличение содержания альмандина к краевой части зоны). Промежуточные зоны могут быть сопоставлены с метасоматическими изменениями и, возможно, пропилитизацией. Краевые зоны интерпретируются как участки, связанные с кристаллизацией либо в рамках условий формирования пропилитов, либо в рамках пренит-пумпеллитовой фации. В пользу последнего предположения свидетельствует тот факт, что гранаты краевых зон равновесны с пренитом и пумпеллитом.

Идеализированная модель граната ЦБЗК с наблюдаемыми в нем неоднородностями и явлениями показана на рис. 10.

Включенияgrossулярового граната и стрингеры морфологически очень схожи с аналогичными образованиями в изученных А. Л. Перчуком гранатах из эклогитов района Фаро ком-

плекса Юкон-Танана, Канада [Perchuk et al., 1999; Перчук, 2003]. И хотя их минеральный состав и тип зональности (прогрессивный) несколько иные, микронзондовые профили через включения отражают ту же обратную зависимость содержания пиральспитовых компонентов и кальция, что и в представленных профилях гранатов из ЦБЗК. Включенияgrossуляровых гранатов А. Л. Перчуком трактуются как реликтовые, сформировавшиеся в процессе более раннего метаморфического события, поскольку по химическому составу заметно отличаются от состава граната-хозяина и не имеют ничего общего с распределением компонентов в стрингерах или в каймах.

В гранатах ЦБЗК составgrossуляровых включений, напротив, очень близок к составу краевых зон зерен и центральных частей стрингеров. Это указывает на то, что данные включения никак не могут быть реликтовыми, поскольку по химическому составу соотносятся с наиболее поздними фазами кристаллизации и часто напрямую соединены со стрингерами. На рис. 9, б отчетливо видно, что поздниеgrossуляровые выделения по своей сути являются не включениями, а продуктами псевдоморфного замещения настоящих включений, в данном случае – хлорита и эпидота, изначально кристаллизующаясь по их периферии. Такая

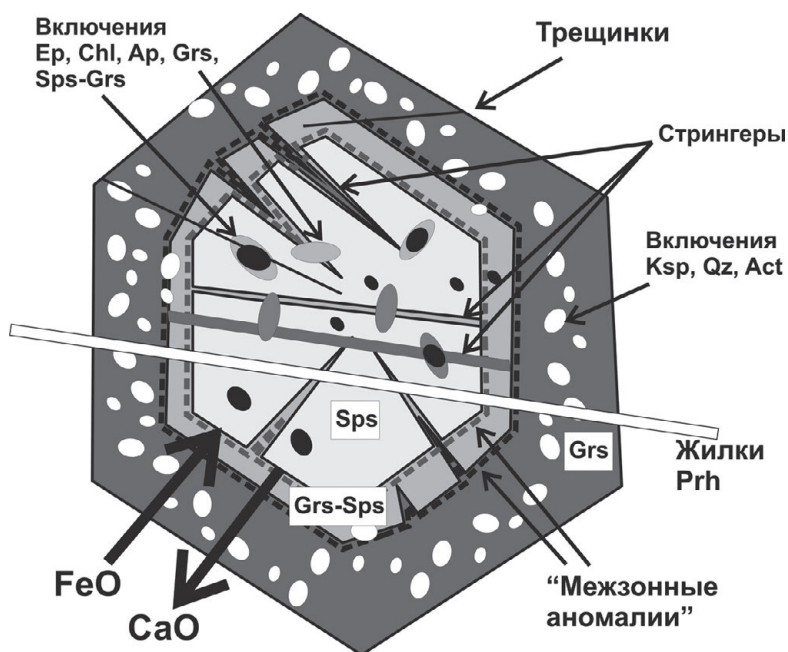


Рис. 10. Идеализированная схема зерна граната с характерными чертами зональности, развития включений и стрингеров, трещин, жилок и «межзонных аномалий»

Fig. 10. An idealized garnet grain pattern with characteristic features of zoning, the development of inclusions and stringers, cracks, veins, and “interseasonal anomalies”

же ситуация наблюдается и в стрингерах (см. рис. 8), где сохраняются реликтовые участки, сложенные хлоритом, замещаемым гроссуляровым гранатом. Следует обратить внимание и на присутствие в качестве «включений» пумпеллиита, температурная область устойчивости которого, при закономерной регрессивной смене парагенезисов, ниже границы устойчивости вмещающего его альмандин-спессартинового граната. Наиболее логичное объяснение этому – псевдоморфная кристаллизация пумпеллиита внутри гранатового зерна.

Таким образом, данные гранаты в физико-химическом аспекте не являются закрытой системой и во внутренних частях зерен могли протекать процессы перекристаллизации не только кальциевого граната, но и других минералов. Микротрещины и стрингеры способствовали этому процессу и служили каналами фильтрации флюида и привноса-выноса компонентов.

Условия «открытой физико-химической системы» граната объясняют формирование так называемых межзонных аномалий. При наблюдаемой резкой смене параметров метаморфогенно-метасоматических процессов на границе зон и вероятной временной паузе бластеза при этой смене границы зон граната можно рассматривать как границы зерен разных минералов, например, граната и амфибола. В этих зонах какое-то время существуют межзерновые (межзонные) каналы, по которым просачиваются флюиды и приводят к закономерным изменениям состава – увеличению кальциевости граната, падению железистости и, как результат, образованию таких «аномалий».

## Заключение

Гранаты метавулканитов Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса обладают уникальными особенностями химического состава и отвечают альмандин-спессартин-гроссуляровому ряду, характеризуются контрастной, сложной зональностью. Они формировались в условиях длительной эволюции, под воздействием дискретно проявленных метаморфических и метасоматических процессов, устойчивы в пределах от амфиболитовой до пренит-пумпеллиитовой фации метаморфизма и пропилитовой фации метасоматоза.

Обратная зависимость содержания железа и кальция в рассматриваемых гранатах делает контрастными его изображения в отраженных электронах, что позволяет лучше понять общие закономерности внутреннего строения, ростовой или диффузионной зональности, внутрен-

ней неоднородности состава, формы и особенностей развития стрингеров и т. д.

В изученных гранатах выявлено по крайней мере две генерации стрингеров и большое количество «включений» гроссуляра в альмандин-спессартине и в спессартин-гроссуляре, которые не были бы видны при других составах.

Зерна граната не всегда являются закрытой системой. В некоторых случаях наблюдаются процессы перекристаллизации и замещения включений внутри зерен граната более поздними минералами, замещения в минерализованных трещинках, формирование «межзонных аномалий» и кристаллизация граната с химическим составом, соответствующим более поздним генерациям.

*Автор выражает искреннюю благодарность А. И. Слабунову за предоставленную возможность проведения работ на столь интересных объектах в столь экзотических местах, ценные советы и замечания в процессе работы и подготовки статьи; Сумиту Мишра и Виноду Сингху за прекрасный прием, познавательное общение, транспортное и геологическое сопровождение полевых работ.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-55-45005 ИНД-а), является вкладом в выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН, проект А18-118020290085-4).*

## Литература

- Метасоматизм и метасоматические породы / Ред. В. А. Жариков, В. Л. Русинов. М.: Научный мир, 1998. 492 с.*
- Перчук А. Л. Петрология и минеральная хронометрия коровых эклогитов: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2003. 333 с.*
- Перчук А. Л., Варламов Д. В. Новый тип проградной гетерогенности граната (на примере эклогитов Большого Кавказа) // Геохимия. 1995. № 9. С. 1296–1310.*
- Русинов В. А. Геологические и физико-химические закономерности пропилитизации. М.: Наука, 1972. 204 с.*
- Сибелев О. С., Слабунов А. И., Мишра С., Сингх В. Метаморфизм Центрально-Бунделкхандского зеленокаменного комплекса Бунделкхандского кратона Индийского щита // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 512–516. doi: 10.31241/fns.2019.16.104*
- Соболев Н. В. Парагенетические типы гранатов. М.: Наука, 1964. 219 с.*
- Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrological application // Can. Mineral. 1991. Vol. 29, no. 4. P. 833–855.*

Berry L. G., Mason B., Dietrich R. V. Mineralogy. San Francisco: W. H. Freeman, 1959. 630 p.

Blundy J. D., Holland T. J. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer // Contrib. Mineral. Petrol. 1990. Vol. 104, no. 2. P. 208–224.

Donna L. W., Bernard W. E. Abbreviations for names of rock-forming minerals // Amer. Mineral. 2010. Vol. 95. P. 185–187.

Fonarev V. I., Graphchikov A. A., Konilov A. N. A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes // Int. Geol. Rev. 1991. Vol. 33, no. 8. P. 743–783.

Grew E. S., Locock A. J., Mills S. J., Galuskin I. O., Galuskin E. V., Hålenius U. Nomenclature of the garnet supergroup // Amer. Mineral. 2013. Vol. 98. P. 785–811.

Kaur P., Zeh A., Chaudhri N., Eliyas N. Unravelling the record of Archaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, northern India using U-Pb zircon – monazite ages, Lu-Hf isotope systematics, and whole-rock geochemistry of granitoids // Precambrian Res. 2016. Vol. 281. P. 384–413.

Malviya V. P., Arina M., Pati J. K., Kaneko Y. Petrology and geochemistry of metamorphosed basaltic pillow lava and basaltic komatiite in the Mauranipur arc: subduction related volcanism in the Archaean Bundelkhand craton, Central India // J. Mineral. Petrol. Sci. 2006. Vol. 101. P. 199–219.

Nasipuri P., Saha L., Hangqiang X., Pati J. K., Satyanaryanan M., Sarkar S., Bhandari A., Gaur Y. Paleoproterozoic crustal evolution of the Bundelkhand Craton, North Central India // Earth's Oldest Rocks. 2019. Ch. 31. P. 793–817.

Pati J. K., Patel S. C., Pruseth K. L., Malviya V. P., Arima M., Raju S., Pati P., Prakash K. Geology and geochemistry of giant quartz veins from the Bundelkhand Craton, Central India and their implications // J. Earth Syst. Sci. 2007. Vol. 116. P. 497–510.

Perchuk A. L., Phillipot P., Erdmer P., Fialin M. Rates of thermal equilibration at the onset of subduction deduced from diffusion modeling of eclogitic garnet, Yukon-Tanana terrain // Geol. 1999. Vol. 27. P. 531–534.

Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised // J. Metamorphic Geol. 1985. Vol. 3, no. 3. P. 231–243.

Ramakrishnan M., Vaidyanadhan R. Geology of India // Geol. Society of India. 2010. 556 p.

Saha L., Pant N. C., Pati J. K., Upadhyay D., Berndt J., Bhattacharya A., Satyanaryanan M. Neoproterozoic high-pressure margarite – phengitic muscovite – chlorite corona mantled corundum in quartz-free high-Mg, Al phlogopite – chlorite schists from the Bundelkhand craton, north central India // Contrib. Mineral. Petrol. 2011. Vol. 161. P. 511–530.

Schmidt M. W. Amphibole composition as a function of buffer assemblage and pressure: an experimental approach // EOS, Trans., American Geophysical Union. AGU. Fall Meeting, 1991. Vol. 72, no. 44. Suppl. P. 547.

Singh P. K., Verma S. K., Moreno J. A., Singh V. K., Malviya P. K., Oliveira E. P., Mishra S., Arima M. Geochemistry and Sm-Nd isotope systematics of metabasalts from the Babina and Mauranipur greenstone belts, Bundelkhand Craton: Implications for tectonic setting and Paleoproterozoic mantle evolution // Lithos. 2019. Vol. 330–331. P. 90–107. doi: 10.1016/j.lithos.2019.02.010

Singh S. P. Archaean geology of Bundelkhand craton, Central India: an overview // Gondwana Geol. Magazine. 2012. Spl vol. no. 13. P. 125–140.

Singh S. P., Dwivedi S. B. Garnet – sillimanite – cordierite – quartz-bearing assemblages from early Archaean supracrustal rocks of Bundelkhand Massif, Central India // Curr Sci. 2009. Vol. 97. P. 103–107.

Singh V. K., Slabunov A. The central Bundelkhand Archaean greenstone complex, Bundelkhand Craton, Central India: geology, composition, and geochronology of supracrustal rocks // Int. Geol. Rev. 2015. Vol. 57. P. 1349–1364.

Singh V. K., Slabunov A. Two types of Archaean supracrustal belts in the Bundelkhand craton, India: Geology, geochemistry, age and implication for craton crustal evolution // J. Geol. Soc. India. 2016. Vol. 88. P. 339–348.

Slabunov A. I., Singh V. K. Meso-Neoproterozoic crustal evolution of the Bundelkhand Craton, Indian Shield: new data from greenstone belts // Int. Geol. Rev. 2019a. Vol. 61, iss. 11. doi: 10.1080/00206814.2018.1512906

Slabunov A. I., Singh V. K. The new tectonic division of the Bundelkhand Craton, Indian Shield // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019b. № 16. С. 521–524. doi: 10.31241/FNS. 2019.16.106

Slabunov A., Singh V. K., Kumar B., Xiaoli L. Paleoproterozoic zircons from quartzite of South Bundelkhand Supracrustal Complex: origin and implications for crustal evolution in Bundelkhand Craton, Central India // Current Sci. 2017. Vol. 112. P. 794–801.

Wells P. R. A. P-T conditions in the Moines of the Central Highlands, Scotland // J. Geol. Soc. London. 1979. Vol. 136. P. 663–671.

Поступила в редакцию 30.01.2020

## References

Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks]. Eds. V. A. Zharkov, V. L. Rusinov. Moscow: Nauchnyi mir, 1998. 492 p.

Perchuk A. L. Petrologiya i mineral'naya khronometriya korovykh eklogitov [Petrology and mineral chronometry of crustal eclogites]: DSc (Dr. of Geol.) thesis. Moscow, 2003. 333 p.

Perchuk A. L., Varlamov D. V. Novyi tip progradnoi geterogenosti granata (na primere eklogitov Bol'shogo Kavkaza) [A new type of prograde garnet heterogeneity (a case study of the Greater Caucasus eclogites)]. Geokhim. [Geochem.]. 1995. No. 9. P. 1296–1310.

Rusinov V. A. Geologicheskie i fiziko-khimicheskie zakonomernosti propilitizatsii [Geological and physico-chemical characteristics of propylitization]. Moscow: Nauka, 1972. 204 p.

Sibelev O. S., Slabunov A. I., Mishra S., Singkh V. Metamorfizm Tsentral'no-Bundelkhandskogo zelenogo Kavkaza) [A new type of prograde garnet heterogeneity (a case study of the Greater Caucasus eclogites)]. Geokhim. [Geochem.]. 1995. No. 9. P. 1296–1310.

Sibelev O. S., Slabunov A. I., Mishra S., Singkh V. Metamorfizm Tsentral'no-Bundelkhandskogo zeleno-

kamnogo kompleksa Bundelkhandskogo kratona Indiškogo shchita [Metamorphism of the Central Bundelkhand greenstone complex of the Bundelkhand Craton, Indian Shield]. *Trudy Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNTs RAN* [Trans. A. Fersman Sci. Session of Geol. Inst. KSC RAS]. 2019. No. 16. P. 512–516. doi: 10.31241/fns.2019.16.104

Sobolev N. V. Parageneticheskie tipy granatov [Paragenetic types of garnets]. Moscow: Nauka, 1964. 219 p.

Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrological application. *Can. Mineral.* 1991. Vol. 29, no. 4. P. 833–855.

Berry L. G., Mason B., Dietrich R. V. Mineralogy. San Francisco: W. H. Freeman, 1959. 630 p.

Blundy J. D., Holland T. J. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. Vol. 104, no. 2. P. 208–224.

Donna L. W., Bernard W. E. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Mineral.* 2010. Vol. 95. P. 185–187.

Fonarev V. I., Graphchikov A. A., Konilov A. N. A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes. *Int. Geol. Rev.* 1991. Vol. 33, no. 8. P. 743–783.

Grew E. S., Locock A. J., Mills S. J., Galuskin I. O., Galuskin E. V., Hålenius U. Nomenclature of the garnet supergroup. *Amer. Mineral.* 2013. Vol. 98. P. 785–811.

Kaur P., Zeh A., Chaudhri N., Eliyas N. Unravelling the record of Archaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, northern India using U-Pb zircon – monazite ages, Lu-Hf isotope systematics, and whole-rock geochemistry of granitoids. *Precambrian Res.* 2016. Vol. 281. P. 384–413.

Malviya V. P., Arina M., Pati J. K., Kaneko Y. Petrology and geochemistry of metamorphosed basaltic pillow lava and basaltic komatiite in the Mauranipur arc: subduction related volcanism in the Archaean Bundelkhand craton, Central India. *J. Mineral. Petrol. Sci.* 2006. Vol. 101. P. 199–219.

Nasipuri P., Saha L., Hangqiang X., Pati J. K., Satyanaryanan M., Sarkar S., Bhandari A., Gaur Y. Paleoaerhaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, North Central India. *Earth's Oldest Rocks.* 2019. Ch. 31. P. 793–817.

Pati J. K., Patel S. C., Pruseth K. L., Malviya V. P., Arima M., Raju S., Pati P., Prakash K. Geology and geochemistry of giant quartz veins from the Bundelkhand Craton, Central India and their implications. *J. Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 116. P. 497–510.

Perchuk A. L., Phillipot P., Erdmer P., Fialin M. Rates of thermal equilibration at the onset of subduction deduced from diffusion modeling of eclogitic garnet, Yukon-Tanana terrain. *Geol.* 1999. 27. P. 531–534.

Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised. *J. Metamorph. Geol.* 1985. Vol. 3, no. 3. P. 231–243.

Ramakrishnan M., Vaidyanadhan R. Geology of India. *Geol. Society of India.* 2010. 556 p.

Saha L., Pant N. C., Pati J. K., Upadhyay D., Berndt J., Bhattacharya A., Satyanaryanan M. Neoaerhaean high-pressure margarite – phengitic muscovite – chlorite corona mantled corundum in quartz-free high-Mg, Al phlogopite – chlorite schists from the Bundelkhand craton, north central India. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2011. Vol. 161. P. 511–530.

Schmidt M. W. Amphibole composition as a function of buffer assemblage and pressure: an experimental approach. *EOS, Trans., American Geophysical Union.* AGU. Fall Meeting. 1991. Vol. 72, no. 44. Suppl. P. 547.

Singh P. K., Verma S. K., Moreno J. A., Singh V. K., Malviya P. K., Oliveira E. P., Mishra S., Arima M. Geochemistry and Sm-Nd isotope systematics of metabasalts from the Babina and Mauranipur greenstone belts, Bundelkhand Craton: Implications for tectonic setting and Paleoaerhaean mantle evolution. *Lithos.* 2019. Vol. 330–331. P. 90–107. doi: 10.1016/j.lithos.2019.02.010

Singh S. P. Archaean geology of Bundelkhand Craton, Central India: an overview. *Gondwana Geol. Magazine.* 2012. Spl vol. no. 13. P. 125–140.

Singh S. P., Dwivedi S. B. Garnet – sillimanite – cordierite – quartz bearing assemblages from early Archaean supracrustal rocks of Bundelkhand Massif, Central India. *Curr. Sci.* 2009. Vol. 97. P. 103–107.

Singh V. K., Slabunov A. The central Bundelkhand Archaean greenstone complex, Bundelkhand Craton, Central India: geology, composition, and geochronology of supracrustal rocks. *Int. Geol. Rev.* 2015. Vol. 57. P. 1349–1364.

Singh V. K., Slabunov A. Two types of Archaean supracrustal belts in the Bundelkhand craton, India: Geology, geochemistry, age and implication for craton crustal evolution. *J. Geol. Soc. India.* 2016. Vol. 88. P. 339–348.

Slabunov A. I., Singh V. K. Meso-Neoaerhaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, Indian Shield: new data from greenstone belts. *Int. Geol. Rev.* 2019a. Vol. 61, iss. 11. doi: 10.1080/00206814.2018.1512906

Slabunov A., Singh V. K. The new tectonic division of the Bundelkhand Craton Indian Shield. *Trudy Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNTs RAN* [Trans. A. Fersman Sci. Session of Geol. Inst. KSC RAS]. 2019b. No. 16. P. 521–524. doi: 10.31241/FNS.2019.16.106

Slabunov A., Singh V. K., Kumar B., Xiaoli L. Paleoaerhaean zircons from quartzite of South Bundelkhand Supracrustal Complex: origin and implications for crustal evolution in Bundelkhand Craton, Central India. *Curr. Sci.* 2017. Vol. 112. P. 794–801.

Wells P. R. A. P-T conditions in the Moines of the Central Highlands, Scotland. *J. Geol. Soc. London.* 1979. Vol. 136. P. 663–671.

Received January 30, 2020

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Сибелев Олег Станиславович**  
научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: Sibelev@krc.karelia.ru  
тел.: +79215252763

**CONTRIBUTOR:**

**Sibelev, Oleg**  
Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St. 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: Sibelev@krc.karelia.ru  
tel.: +79215252763