

© Д. чл. Г. Ю. ИВАНЮК, д. чл. Я. А. ПАХОМОВСКИЙ, А. В. БАЗАЙ,  
д. чл. В. Н. ЯКОВЕНЧУК, д. чл. Ю. П. МЕНЬШИКОВ, П. М. ГОРЯИНОВ

## ЦЕОЛИТЫ ИЗ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЖИЛ В ПОРОДАХ ПОЛОСЧАТОЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ФОРМАЦИИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

G. Yu. IVANYUK, Ya. A. PAKHOMOVSKY, A. V. BAZAI, V. N. YAKOVENCHUK,  
Yu. P. MEN'SHIKOV, P. M. GORYAINOV. ZEOLITES FROM HYDROTHERMAL VEINS WITHIN  
ROCKS OF BANDED IRON ORE FORMATION OF KOLA PENINSULA

Геологический институт Кольского научного центра РАН,  
184200, Апатиты, ул. Ферсмана, 14

Various types of hydrothermal veins with calcium zeolites: chabazite-Ca, stilbite-Ca, heulandite-Ca, laumontite and scolecite, associated with fluorapophyllite, prehnite, thaumasite, gypsum, and some other low-temperature minerals, are widespread within biotite-muscovite, nodular, biotite and hornblende-biotite gneisses in the contact zone with iron quartzites of Olenegorskoye and Kirovogorskoye banded iron ore deposits. They were formed in the outer parts of iron ore bodies as a constituent of the process of nodular gneisses formation, due to reactions related to the silicon dioxide input from iron quartzites into biotite gneisses. Taking into consideration this geological position of the zeolite-bearing segregations, their concordance with the high-temperature textures of the host gneisses, and their age dating, it is possible to estimate their forming conditions (temperature from 200 down to 50 °C, and pressure from 300 down to 1 bar) as corresponding to the final stage of formation of the banded iron ore deposits.

Различного рода гидротермальные жилы с кальциевыми цеолитами, фторапофиллитом, пренином, таумаситом, гипсом и другими низкотемпературными минералами широко распространены в биотито-мусковитовых, нодулярных, биотитовых и роговообманково-биотитовых гнейсах приконтактовой с железистыми кварцитами зоны Оленегорского и Кировогорского месторождений (Иванюк и др., 2001). На некоторых участках количество линзовидных минерализованных полостей, распределенных полойно в гнейсах, превосходит таковое в Хибинском или Ковдорском массивах, из-

вестных богатством гидротермальных образований (Яковенчук и др., 1999; Иванюк и др., 2002). Внимание к цеолитсодержащим жилам, а правильнее было бы назвать их сегрегациями, привлечено как необычностью их состава для архейских высокометаморфизованных комплексов и архейским возрастом самих жил, так и проблемой золотосеребряного оруденения, связанного с этими жилами (Иванюк и др., 2001).

Рассматриваемые жилы обычно представляют собой линзовидные сегрегации, достигающие полуметра в поперечнике и 20 см в толщину, согласно залегающие в кислых гнейсах и «обтекаемые» метаморфической полосчатостью последних. Обычно сегрегации имеют отчетливое зональное строение. В их состав входят: 1) существенно кварцевые зальбанды с кристаллами роговой обманки, эпидота, диопсида, андрадита, титанита, фторгидроксилapatита, тонкозернистыми плагиоклазовыми, мусковитовыми, скаполитовыми и цоизитовыми желваками, кристаллами и агрегатами гроссуляра, пирита, борнита, халькопирита и других минералов; 2) центральная друзовая зона, представленная кристаллами пумпеллиита-Mg, клиноцоизита, шабазита-Ca, гейландита-Ca, стильбита-Ca, фторапофиллита, кальцита и других минералов с полостями, иногда заполненными волокнистым таумаситом, зернистыми ангидритом и гипсом. Кроме того, совместно с пектолитом цеолиты заполняют тонкие трещины в долеритах, дайки которых широко распространены в приповерхностной части рудной зоны, а также кавернозные пустоты на границе гнейсов и секущих их гранитных пегматитов.

В результате детального минералогического изучения пород полосчатой железорудной формации Кольского полуострова нами установлено 114 минералов, включая 5 цеолитов, — такое разнообразие крайне необычно для высокометаморфизованных архейских комплексов и требует всестороннего обсуждения. Ниже представлены данные о морфологии, парагенетических взаимоотношениях и составе кальциевых цеолитов Оленегорского и Кировогорского месторождений. Все минералы диагностированы микронзондовым (MS-46 Cameca) и рентгенофазовым методами анализа.

## ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛОВ

**Гейландит-Ca** — достаточно редкий минерал цеолито-кварцевых жил в биотитовых, мусковито-биотитовых и нодулярных гнейсах Оленегорского и Кировогорского месторождений. В пустотах гроссуляро-кварцевой жилы в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения его упло-

щенные по *a* бесцветные кристаллы (до 8 мм в поперечнике) с гранями пинакоидов  $\{010\}$ ,  $\{001\}$ ,  $\{101\}$  и  $\{1\bar{0}1\}$  (рис. 1) нарастают в ассоциации с шабазитом-Ca, стильбитом-Ca, ломонтином, пумпеллиитом-Mg, диопсидом, цоизитом, клиноцоизитом и пиритом на гроссуляр и кварц. В кавернозной осевой части, расположенной неподалеку цеолито-кварцевой жилы, гейландит-Ca в виде щеток мелких (до 1 мм в поперечнике) бесцветных таб-

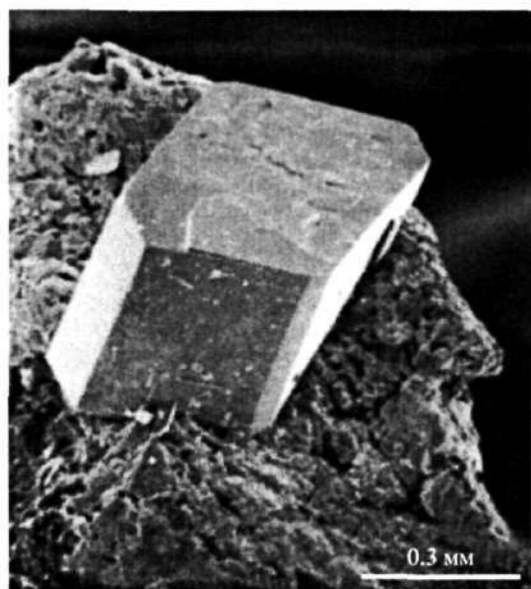


Рис. 1. Кристалл гейландита-Ca в пустоте гроссуляро-кварцевой жилы в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения.

Fig. 1. The heulandite-Ca crystal in cavity of grossular-quartz vein within biotite gneisses of Olenegorskoye iron ore deposit.

## Химический состав цеолитов (мас.%)

## Chemical composition of zeolites (wt %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	гейландит-Са				стильбит-Са				шабазит-Са				ломонтит			сколецит
CaO	5.77	5.86	7.04	5.29	7.94	7.96	8.02	7.71	6.95	7.87	7.69	8.51	8.00	11.59	10.91	13.59
SrO	2.54	2.35	0.85	1.80	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—	—	—
BaO	0.23	0.26	0.13	2.96	—	—	—	—	0.14	—	—	—	—	—	—	—
K <sub>2</sub> O	2.96	3.30	2.47	0.85	0.06	0.62	1.02	0.93	3.90	2.66	2.56	1.44	3.09	0.55	1.07	—
Na <sub>2</sub> O	—	0.12	0.12	0.65	0.21	0.05	0.25	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.50	17.03	16.00	16.21	17.02	17.33	17.87	17.09	16.66	17.15	18.56	17.57	17.67	20.98	20.95	25.46
SiO <sub>2</sub>	56.95	57.42	58.00	57.53	56.35	56.68	54.76	55.35	50.75	51.41	51.72	49.29	53.83	53.55	54.17	46.61
Σ	84.95	86.34	84.61	85.29	81.58	82.64	81.92	81.20	78.40	79.09	80.53	77.06	82.59	86.67	87.10	85.66

## Коэффициенты в формулах

0.5Ca	5.82	5.84	7.06	5.32	8.02	7.96	8.16	7.88	2.54	2.82	2.69	3.13	5.52	7.62	7.60	1.90
0.5Sr	1.38	1.26	0.46	0.98	—	—	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—
0.5Ba	0.08	0.10	0.04	1.10	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—
K	1.78	1.96	1.48	0.51	0.19	0.37	0.62	0.57	0.85	0.57	0.53	0.32	1.27	0.22	0.41	—
Na	—	0.11	0.11	0.59	0.04	0.05	0.23	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	9.16	9.32	8.83	8.97	9.45	9.54	10.00	9.60	3.35	3.39	3.57	3.55	6.70	7.58	7.52	1.96
Si	26.84	26.68	21.17	27.03	26.55	26.46	26.00	26.40	8.65	8.61	8.43	8.45	17.30	16.42	16.48	3.04
O	71.95	71.92	72.16	71.77	71.40	71.41	71.50	71.48	24.03	24.01	23.83	23.96	48.04	48.13	48.00	9.98
H <sub>2</sub> O*	23.66	21.17	24.04	23.05	28.94	28.94	28.63	29.90	12.28	11.69	10.59	13.11	18.67	13.63	13.10	3.12

Примечание. \* Вычислена на основании недостатка суммы общего содержания оксидов до 100 мас.%; 1, 2, 9 — гроссуляро-кварцевая жила в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения; 3, 7, 8, 10, 11, 13, 14 — цеолито-кварцевая жила в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения; 4—6 — кварцевая жила в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения; 12 — цеолито-клиноцоизито-кварцевая жила в нодулярных гнейсах Кировогорского месторождения; 15 — ломонтитовый прожилок в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения; 16 — флогопито-роговообманковая сегрегация в биотито-мусковитовых гнейсах Кировогорского месторождения. Расчет формул сделан на основе (Al+Si)=36 для гейландита-Са и стильбита-Са, (Al+Si)=12 для шабазита-Са, (Al+Si)=24 для ломонтита и (Al+Si)=5 для сколецита.



Рис. 2. Кристаллы стильбита-Са в пустоте цеолито-олигоклазо-роговообманковой сегрегации в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения.

Fig. 2. Stilbite-Ca crystals in cavity of the zeolite-oligoclase-hornblende segregation within biotite gneisses of Olenegorskoye iron ore deposit.

литчатых кристаллов служит подложкой для кристаллов шабазита-Са, стильбита-Са, фторапофиллита, фторопатита и пирита. В кварцевой жиле, залегающей в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения, гейландит-Са образует бесцветные уплощенно-призматические кристаллы, нарастающие на кварц в ассоциации с тремолитом, стильбитом-Са, дравином и андезином. Крупные (до 1.3 см в поперечнике) таблитчатые кристаллы гейландита-Са встречаются в цеолито-кварцево-эпидотовой жиле в нодулярных гнейсах Кировогорского месторождения. Свежий гейландит-Са водяно-прозрачен, но при выветривании мутнеет и приобретает зеленовато-серую или кремовую окраску. По данным микрозондового анализа (см. таблицу), недостаток кальция в составе минерала компенсируется калием, натрием, стронцием и барием. Количество остальных компонентов близко к стехиометричному. Измененный, помутневший гейландит-Са содержит несколько меньше воды, чем свежий, водяно-прозрачный.

**Стильбит-Са** наряду с шабазитом-Са является наиболее распространенным минералом гидротермальных жил в породах кольской полосчатой железорудной формации. В крупной (до 0.3 м в толщину и 0.8 м в длину) цеолито-олигоклазо-роговообманковой сегрегации уплощенно-призматические кристаллы стильбита-Са нарастают на инкрустированные шабазитом-Са стенки центральной полости (рис. 2). Молочно-белые расщепленные кристаллы (до 2.5 см в длину) и сферолиты (до 4 см в диаметре) стильбита-Са вместе с шабазитом-Са, гейландитом-Са, ломонитом, пумпеллиитом-Mg, фторапофиллитом, цоизитом, андрадитом, цирконом, фторопатитом и пиритом наблюдаются на стенках кавернозных пустот кварцевой жилы, секущей биотитовые гнейсы Оленегорского месторождения. В массе сахаровидного кварца этой же жилы стильбит-Са образует крупные (до 17 см в диаметре) радиально-лучистые агрегаты полупрозрачных пластинчатых индивидов, включающие в себя кристаллы гейландита-Са, пирита, фторопатита и зернистые агрегаты клиноцоизита. В кварцево-плаггиоклазо-роговообманковой сегрегации в нодулярных гнейсах Кировогорского месторождения точно такие же расщепленные кристаллы стильбита-Са (до 1.5 см в длину) нарастают в ассоциации со снежно-белым тонковолокнистым тау-

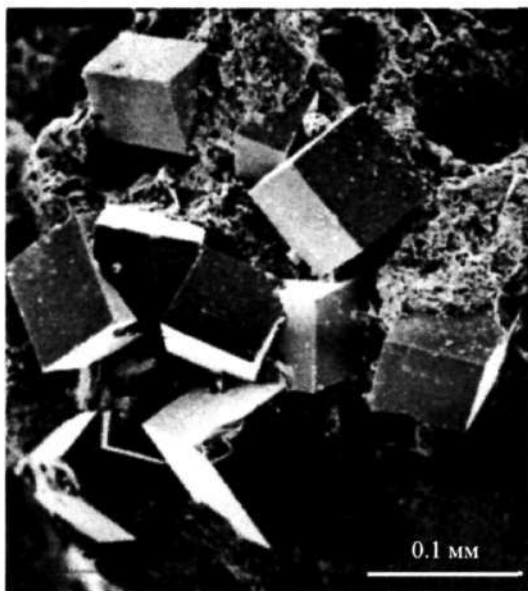


Рис. 3. Кристаллы шабазита-Са в пустоте гроссуляро-кварцевой жилы в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения.

Fig. 3. Chabazite-Ca crystals in cavity of grossular-quartz vein within biotite gneisses of Olenegorskoye iron ore deposit.

маситом и синим фторапатитом на бесцветные кристаллы шабазита-Са. В апоамфиболитовых диопсидитах Кировогорского месторождения желтовато-коричневые расщепленные кристаллы и сферолиты стильбита-Са (до 1 см в диаметре) ассоциируют с кристаллами клиноцоизита, шабазита-Са, пирита и титанита. В нодулярных гнейсах этого же месторождения отдельные кристаллы и сферолиты (до 1.5 см в длину/диаметре) молочно-белого стильбита-Са нарастают на инкрустированные шабазитом-Са стенки центральной полости в цеолито-клиноцоизито-кварцевой сегрегации. В крупной (20 см в поперечнике) полости на границе этих гнейсов и секущей их жилы микроклинового гранитного пегматита встречается друза расщепленных оранжевых кристаллов (до 3 см в длину) стильбита-Са с включениями хризоколлы. Помимо различных гидротермальных жил стильбит-Са часто развивается также по трещинам в долеритах, образуя мелкие (до 1 мм в длину) коричнево-желтые призматические кристаллы в ассоциации с шабазитом-Са. Для стильбита-Са чрезвычайно характерны двойники срастания по (010), иногда встречаются крестообразные двойники прорастания по (100). По данным микросондового анализа (см. таблицу), состав стильбита-Са полностью соответствует стехиометрии этого минерала, а изоморфные замещения ограничены стандартной схемой  $\text{Ca}^{2+}\text{Al}^{3+} \rightleftharpoons \text{K}^+\text{Si}^{4+}$ .

**Шабазит-Са** — характерный минерал гидротермальных жил Кировогорского и Оленегорского месторождений, где он образует щетки бесцветных ромбоэдрических кристаллов (до 8 мм в поперечнике), нарастающих на стенках кавернозных пустот. В пустотах растворения гроссуляро-кварцевой жилы в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения крупные (до 7 мм в поперечнике) бесцветные кристаллы и двойники шабазита-Са находятся в ассоциации со фторапатитом, диопсидом, пумпеллиитом-Mg, гейландитом-Са, стильбитом-Са, ломонитом и кальцитом, нарастающими на гранат и кварц (рис. 3). В пустотах цеолитового прожилка в апоамфиболитовых диопсидитах Кировогорского месторождения шабазит-Са образует щетки бесцветных кристаллов (до 1 мм в поперечнике) в ассоциации со стильбитом-Са, фторапатитом, титанитом, клиноцоизитом и пиритом, а в пустотелой шабазито-клиноцоизито-квар-

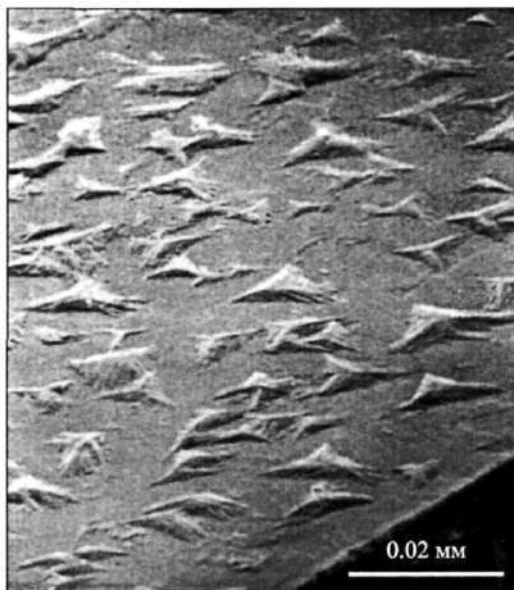


Рис. 4. Скелетные кристаллы гётита на гранях кристалла шабазита-Са из цеолито-кварцево-роговообманковой сегрегации в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения.

Fig. 4. Skeleton goethite crystals on faces of a chabazite-Ca crystal from zeolite-quartz-hornblende segregation within biotite gneisses of Olenegorskoye iron ore deposit.

цевой сегрегации в нодулярных гнейсах этого месторождения — щетки бесцветных кристаллов (до 1 мм в поперечнике), пронизанных тонкоигльчатый таумаситом. Мелкие (до 0.5 мм) бесцветные кристаллы шабазита-Са совместно со стильбитом-Са часто наблюдаются на поверхности трещин в дайках долеритов. Практически во всех упомянутых жилах встречены редкие, но характерные для этого минерала двойники прорастания. На поверхности кристаллов шабазита-Са обычно отмечается эпитактическое (?) нарастание скелетных кристаллов гётита (рис. 4); нередко также и дендриты гидроксидов Mn. По данным микрозондового анализа (см. таблицу), в составе шабазита-Са постоянно наблюдается недостаток катионов в позиции А, компенсирующий повышенное за счет алюминия содержание кремния.

**Ломонтит** получил в рассматриваемых породах значительно меньшее распространение, чем вышеописанные цеолиты. В цеолито-кварцевой жиле в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения встречены сростки его молочно-белых уплощенно-призматических кристаллов (до 2 мм в длину), нарастающих вместе со стильбитом-Са, гейландитом-Са, фторопатитом и пиритом на инкрустированные голубым пумпеллинитом-Mg стенки пустот. Близкий по морфологии ломонтит, нарастающий на стенки пустот растворения граната и кварца в ассоциации с теми же самыми цеолитами, встречен в расположенной неподалеку гроссуляро-кварцевой жиле. Мономинеральный ломонтиновый прожилок в двуслюдяных гнейсах Оленегорского месторождения сложен бледно-розовыми неполногранными кристаллами (до 2 см в длину и 5 мм в поперечнике), а в тонком (3—6 мм) альбитовом прожилке в биотитовых гнейсах Кировогорского месторождения ломонтит представлен радиально-лучистыми агрегатами игльчатых кристаллов (до 8 мм в длину), ассоциирующих с халькопиритом и продуктами его изменения: хризоколлой, малахитом и гётитом. По данным микрозондового анализа (см. таблицу), химический состав ломонтита близок к таковому леонгардита — разнородности, обогащенной K и Na, с дефицитом H<sub>2</sub>O.

**Сколецит** встречен в биотито-роговообманковой сегрегации, обнаруженной в мусковито-биотитовых гнейсах Кировогорского месторождения. В центре сегрега-



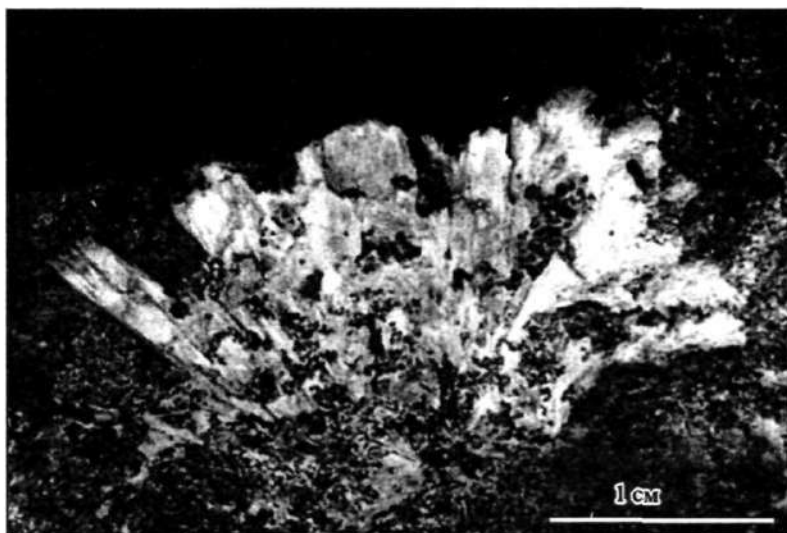


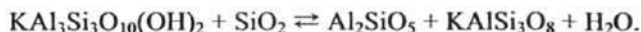
Рис. 5. Сферолит сколецита из биотито-роговообманковой сегрегации в мусковито-биотитовых гнейсах Кировогорского месторождения.

Fig. 5. Spherulite of scolecite from biotite-hornblende segregation within muscovite-biotite gneisses of Kirovogorskoye banded iron ore deposit.

ции находится полость (14 см в поперечнике), стенки которой инкрустированы грязно-зелеными неполногранными кристаллами эпидота, на которые, в свою очередь, нарастают одиночные сферолиты (до 3 см в диаметре) белых тонкоигловчатых кристаллов сколецита (рис. 5). По данным микрозондового анализа сколецита (см. таблицу), его состав соответствует стехиометрии  $\text{Ca}_{0.95}[\text{Al}_{1.96}\text{Si}_{3.04}\text{O}_{9.98}] \cdot 3.12\text{H}_2\text{O}$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среднее содержание кремния в естественном ряду пород полосчатой железорудной формации (от осевой зоны к контактам с тоналитами) сначала незначительно возрастает при переходе от гематито-магнетитовых железистых кварцитов к магнетитовым и сульфидно-магнетитовым кварцитам, затем резко падает в скарноидах и кальцифирах, столь же резко возрастает в глиноземистых гнейсах и снова незначительно уменьшается в биотитовых гнейсах и амфиболитах (рис. 6). В результате наибольшим содержанием кремния характеризуются глиноземистые гнейсы, наименьшим — кальцифиры, железистые кварциты и скарноиды. Распределение кремния в железистых кварцитах и биотитовых гнейсах отвечает нормальному закону, в глиноземистых гнейсах — *q*-нормальной модели, в контактирующих с ними апокварцитовых скарноидах — логнормальной модели. Таким образом, мы можем предполагать привнос этого элемента в биотитовые гнейсы из зоны скарноидов, выражающийся в окварцевании рассматриваемых пород (в случае лептитов) или в развитии силлиманита (в случае нодулярных гнейсов) посредством реакций типа:



Следует подчеркнуть, что формирование цеолитовой минерализации также происходит на периферии рудных тел за счет реакций, обусловленных привносом кремнезема из железистых кварцитов в биотитовые гнейсы.



и поэтому большая часть жил пространственно сопряжена с нодулярными гнейсами.

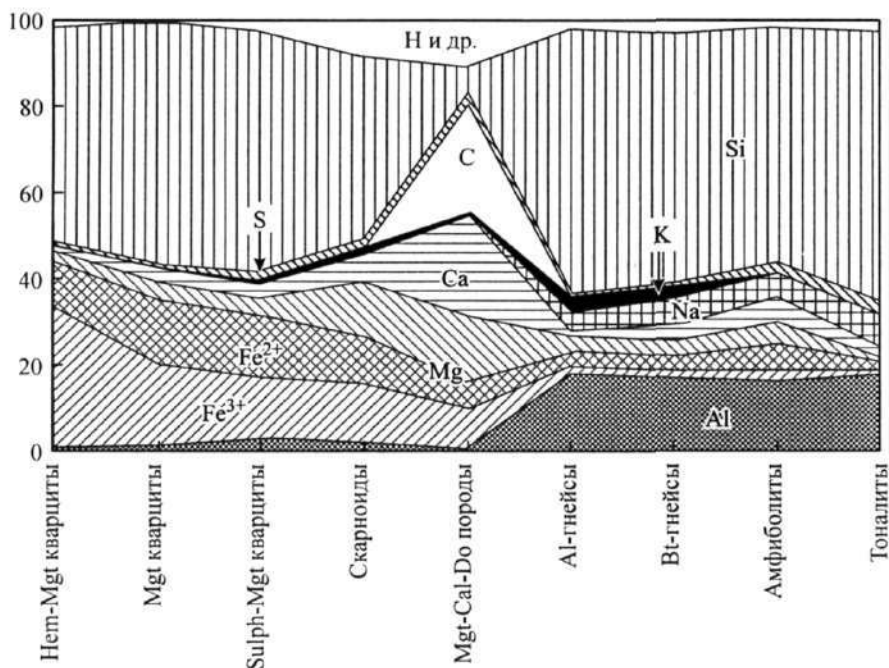


Рис. 6. Средний состав пород полосчатой железорудной формации (ат. % от бескислородной части).

Fig. 6. Average compositions of rocks (at. % of the oxygen-free part) of the banded iron ore formation.

«Pb-Pb возраст» титанита из призальбандовых участков генетически родственной цеолитовым жилам кварцево-эпидото-скаполитовой сегрегации в биотитовых гнейсах Оленегорского месторождения (Жиров и др., 1979) и «U-Pb возраст» кварцево-плагиоклазовой сегрегации во внутрирудных актинолитовых амфиболах Урагубского месторождения (неопубликованные данные Т. Б. Баяновой) составляют соответственно 2630—2530 и 2560 млн лет. Формирование рассматриваемых цеолитов, по данным различных авторов, происходит при температурах от 200 до 50 °C и давлении от 300 до 1 атм (Сендеров, Хитаров, 1970; Tschernich, 1992). Учитывая геологическую позицию цеолитсодержащих сегрегаций в околорудной зоне месторождений и их согласованность с высокотемпературными текстурами вмещающих гнейсов, можно считать эти условия соответствующими заключительному, также архейскому этапу формирования железорудных месторождений.

Иными словами, за период с 2800 млн лет (возраст тоналитов и пород железорудной формации — см.: Горяинов, Иванюк, 2001) до 2550 млн лет температура процессов минералообразования упала до 50 °C, а давление — с 7 до 1 кбар, т. е. от условий амфиболитовой фации метаморфизма до таковых дневной поверхности. Эти данные согласуются с нашими результатами изучения строения Оленегорского и Кировогорского месторождений (Goryainov, Ivanyuk, 1998; Горяинов, Иванюк, 2001) и, помимо прочего, означают, что никаких существенных событий типа наложенного метаморфизма на этой территории с архея до наших дней не происходило. В этой связи хотелось бы упомянуть и о еще более низкотемпературном процессе формирования сульфатной минерализации, представленной гипсом, роценитом, фиброферритом, феррогексагидритом, копианитом, пиккерингитом-галотрихитом, ярозитом, а также самородной серой, пренитом, кальцитом и другими минералами, местами образующими значительные скопления и также приуроченными к периферии рудных тел.

**Благодарности.** Работы проводились при поддержке Министерства природных ресурсов РФ (государственный регистрационный номер проекта 5120023/1).



## Список литературы

- Горяинов П. М., Иванюк Г. Ю.* Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, **2001**. 312 с.
- Жиров К. К., Шестаков К. И., Рюнгген Г. И., Кравченко Э. В.* Радиологическое определение возраста катархейских образований Кольского полуострова // Изв. АН СССР. Сер. геол. **1979**. № 9. С. 3—23.
- Иванюк Г. Ю., Базай А. В., Пахомовский Я. А., Яковенчук В. Н., Горяинов П. М.* Низкотемпературные гидротермальные жилы в породах архейской железорудной формации Кольского полуострова // ЗВМО. **2001**. № 3. С. 16—28.
- Сендеров Э. Э., Хитаров Н. И.* Цеолиты, их синтез и условия образования в природе. М.: Наука, **1970**. 283 с.
- Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П.* Минералы Хибинского массива. М.: Земля, **1999**. 326 с.
- Иванюк Г. Ю., Яковенчук В. Н., Пахомовский Я. А.* Ковдор. Апатиты: Изд-во «Минералы Лапландии», **2002**. 326 с.
- Goryainov P. M., Ivanjuk G. Yu.* On genesis of banded iron-formation of the Kola peninsula. Synergetic aspects // Theophrastus' contributions to advanced studies in geology. Vol. II. Theophrastus Publications A. E., Athens, **1998**. P. 249—267.
- Tschernich R. W.* Zeolites of the World. Geoscience Press, Inc., Phoenix, Arizona, **1992**. 563 p.

Поступила в редакцию  
25 марта 2004 г.