

СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ХИБИНСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА

Г.Ю.Иванюк, П.М.Горяинов, Н.Г.Коноплева, Я.А.Пахомовский, В.Н.Яковенчук,
А.О.Калашников

*Геологический институт Кольского НЦ РАН
ivanyuk@geoksc.apatity.ru*

Хибинский щелочной массив расположен в крайней западной части Кольского полуострова на контакте архейских гранито-гнейсов и протерозойского осадочно-вулканогенного комплекса Имандра–Варзуга. Главными по распространенности породами массива являются фойяиты (включая выделяемые рядом исследователей их разновидности: хибиниты и льявочорриты), слагающие более 70% его объема. Фойяиты разделены на две приблизительно равные по объему части кольцевой (точнее, конической) интрузией мельтейгит-уртитов и апатито-нефелиновых пород (т. н. Главное кольцо), сопровождаемых особой разновидностью обогащенных калием (а скорее, относительно обедненных натрием) пойкилитовых нефелиновых сиенитов – рисчорритов.

Из всех хибинских апатито-нефелиновые месторождений, пространственно и генетически связанных с фойяитами Главного кольца, наиболее характерное строение имеет самое крупное в массиве Коашвинское месторождение. Его объемная геолого-структурная модель была построена нами на основе анализа всех полученных на настоящий момент разведочных и эксплуатационных данных по 106 поперечным разрезам (через 25 метров), 5 продольным разрезам (через 100 м) и 3 погоризонтным планам (+200 м, +100 м, ±0 м). Первичной основой всех построений являлись вынесенные на проекции скважин рудные интервалы с содержанием P_2O_5 более 4 мас. % в качестве основных и с содержанием 2–4 мас. % в качестве вспомогательных.

Оказалось, что Коашвинское месторождение представляет собой достаточно пористый кластер, апатито-нефелиновых пород, морфология которого соответствует таковой перколяционных кластеров. Фрактальная размерность минковского 2D_M рудного штокверка, определенная на погоризонтных планах и продольных разрезах методом Минковского составляет величину 1.59–1.67 на интервале масштабов от 1 до 100 м (Горяинов и др., 2005). Фрактальная размерность рудной зоны на всех погоризонтных планах равна 1.62, а размерность по продольным разрезам (медианное значение) – 1.64. С глубиной фрактальная размерность рассматриваемого штокверка существенно не меняется, поэтому его полную фрактальную размерность можно оценить по уже известному правилу Мандельброта, просто прибавив к полученным размерностям единицу. Оцененная таким образом трехмерная фрактальная размерность апатитового штокверка ${}^3D = 2.6$, действительно, близка к трехмерной размерности теоретического перколяционного кластера $D = 2.54$. Для выявления закономерностей внутреннего строения продуктивной толщи месторождения Коашва мы анализировали спектры Фурье кривых нейтронно-активационного каротажа (НАК) по 6 скважинам, последовательно подсекающим все более глубокие части пологопадающего рудного тела. Фрактальная размерность D_F всех графиков НАК (по сути, концентрационных кривых апатита) лежит в пределах от 1.8 до 2.0 (т.н. фликкер-шум), что характерно для мер, распределенных на перколяционном кластере, включая намагниченность тел железистых кварцитов и эффективного сопротивления мерзлых грунтов (Горяинов, Иванюк, 2001).

Поскольку строение перколяционного кластера не зависит от размера анализируемого участка, можно ожидать, что, как и на многих других месторождениях, здесь можно найти обнажения и даже отдельные образцы, копирующие структуру всего месторождения. На Коашве близкие по морфологии кластеры формируют апатитовые прожилки т. н. сетчатых руд (Иванюк и др., 2002). Фрактальная размерность 3D_M образцов сетчатых руд в среднем составляет величину 2.6, также

близкую к размерности перколяционных кластеров. В результате, нижний предел фрактальности апатитового кластера расширяется, по крайней мере, до 0.01 м. Это означает, что степень заполнения пространства фторапатитом статистически одинакова для образца, обнажения, рудного тела и всего месторождения. Необходимо сразу отметить, что близкую морфологию и фрактальную размерность имеют зоны развития брекчиевых руд, штокверков пегматитовых и гидротермальных жил, участков современного минералообразования (Иванюк и др., 2002), причем все эти структуры также приурочены либо к Главному фойдолитовому кольцу, либо к окружающим его рисчорритам.

Главное кольцо почти на всем своем протяжении имеет симметрично-зональное строение: фойяиты – рисчорриты или лявочорриты – фойдолиты – апатито-нефелиновые породы – фойдолиты – рисчорриты или лявочорриты – фойяиты. Такая зональность массива подчеркивается наличием между рисчорритами и фойяитами прерывистого кольца альбититов и ороговикованных ксенолитов вулканогенно-осадочных пород. Для изучения этой зональности мы отобрали 147 проб через 100–500 м по профилю от ж/д станции Хибинь на окраине массива до вершины г. Вантомнюк в его центре и далее через месторождение Коашва к контакту с вмещающими метаморфитами у подножья г. Китчапахк. Для каждой пробы определен валовый химический состав, содержание микропримесей Li, Cs, Rb, Zn, REE и др., проведен микрозондовый анализ всех обнаруженных минералов, выполнена количественная оценка трахитоидности нефелиновых сиенитов, а также оценка содержания твердых углеводов с различной устойчивостью к термальному крекингу в нефелиновых сиенитах. Рассмотрим основные результаты проведенных исследований.

Результаты анализа химического состава нефелиновых сиенитов (Горяинов и др., 2005) показали, что состав этих пород изменяется симметрично относительно центра массива, причем в районе Главного кольца он практически для всех элементов является экстремальным. В целом, содержание Si и K в составе нефелиновых сиенитов плавно возрастает от краев массива к его центру за счет Zr, Fe³⁺, Mn, Sr, Zn и Li, а в районе Главного кольца в происходит резкое возрастание содержания практически всех компонентов за счет кремния и воды. В районе Малого кольца в фойяитах увеличивается содержание Fe, Mg, Mn, Ca, P, Ti и воды за счет Na и Al. В самом центре массива имеется локальный максимум содержания Al, Na, K, Sr и Cl, образовавшийся за счет Mg, Fe, Mn, Li, P и F. Изменчивость состава нефелиновых сиенитов в отношении большинства элементов резко возрастает при приближении к Главному кольцу, а минимальна она в центре массива. В обобщенном виде зональность массива нефелиновых сиенитов (без учета фойдолитов) выражена в виде резких максимумов первой и второй компонент факторного анализа (метод главных компонент с нормализацией и варимаксным вращением), которые включают в себя 17 переменных с факторными нагрузками более 50 % из 23 анализировавшихся и учитывают 45 % изменчивости данных:

$$F_1 = \frac{\text{Mn}_{85}, \text{Fe}^{3+}_{82}, \text{Fe}^{2+}_{69}, \text{Ti}_{68}, \text{Li}_{64}, \text{Zn}_{64}, \text{Mg}_{63}, \text{REE}_{60}, \text{Zr}_{52}, \text{P}_{50}, \text{F}_{50}}{\text{Al}_{77}}, \quad F_2 = \frac{\text{Rb}_{91}, \text{K}_{83}, \text{Cs}_{81}}{\text{Si}_{50}, \text{Na}_{55}}.$$

Изменения в составе нефелиновых сиенитов начинаются за 2–5 км от их контакта с фойдолитами, причем, чем мощнее фойдолитовая толща, тем шире ореол изменения вмещающих фойяитов. Петрографически эти изменения проявлены, прежде всего, в увеличении содержания темноцветных минералов, ортоклаза и фторапатита за счет нефелина, который нередко замещается ортоклазом и натролитом с образованием кальсилита. Кальсилит формирует каемки вокруг кристаллов нефелина, часто остающиеся в виде реликтов в ортоклазе и натролите после полного замещения ими нефелина. Важно и то, что при приближении к Главному кольцу закономерно изменяется состав всех пороодообразующих минералов (Yakovenchuk et al., 2005).

Исследование *калиевых полевых шпатов* фойяитов показало, что содержание ферриортоклазового и цельзианового миналв в их составе резко возрастает в районе Главного кольца (точка С) по схеме $K + Si \leftrightarrow Ba + Fe^{3+}$. Встречаемость фойяитов, калиевый полевой шпат которых представлен ортоклазом, уменьшается от краевой части массива к его центру, и на этом фоне проявлен резкий «ортоклазовый» максимум вблизи Главного кольца (вероятно, вследствие прогрева фойяитов фойдолитовым расплавом). Степень разориентированности кристаллов калиевого полевого шпата (трахитоидности) фойяитов последовательно увеличивается от краевой и центральной частей массива к Главному кольцу, вблизи которого фойяиты переходят в совершенно изотропные рихсчорриты. Рихсчорриты, полевой шпат в которых представлен исключительно ортоклазом (обычно с повышенным содержанием Fe^{3+} и Ba), будучи наиболее изотропными нефелиновыми сиенитами, выступают, таким образом, в качестве конечного продукта этого процесса.

Изучение состава *нефелина* фойяитов показало, что содержание K и Al в его составе последовательно возрастает от краев к центру массива за счет Na, Si и Fe. На этом фоне в районе Главного кольца происходит заметное обеднение породообразующего нефелина фойяитов K и Al, – обычно сопровождаемое появлением в породе вторичных кальсилита и ортоклаза. В рихсчорритах этот процесс достигает своего максимального развития.

В составе *клинопироксенов* фойяитов при приближении к Главному кольцу происходит значительное увеличение содержания диопсидового и геденбергитового миналов за счет эгиринового минала. Концентрации алюминия и марганца, изменяясь обратно пропорционально друг другу в соответствии со схемой $Ca^{2+}Mn^{2+} \leftrightarrow Na^{+}Al^{3+}$, дают симметричные относительно Главного кольца локальные экстремумы. Указанные изменения происходят на фоне уменьшения содержания титана и увеличения содержания циркония и, отчасти, марганца в составе клинопироксенов от краевой части фойяитового массива к его центру.

Состав *амфиболов* фойяитов также изменяется симметрично относительно Главного кольца (за исключением кремния, содержание которого уменьшается от периферии к центру массива, и цинка, появляющегося в составе амфиболов лишь вблизи центра массива). Соответственно, амфиболы из фойяитов, непосредственно примыкающих к рихсчоррито-фойдолитовой толще Главного кольца (0–2.5 км от контакта) представлены, в основном, рихтеритом, феррорихтеритом и ферроэкерманнитом, амфиболы промежуточной зоны (2.5–10 км от контакта) – арфведсонитом и магнезиоарфведсонитом во внешней от Главного кольца части массива, ферринибейтом, ферриферронибейтом, магнезиокатофоритом, магнезиоферрикатофоритом – во внутренней части. Амфиболы из фойяитов краевой зоны массива представлены рихтеритом, а амфиболы из фойяитов его центральной части – катофоритом, феррикатофоритом и феррорихтеритом.

Содержание слюд ряда *флогопит-аннит* в нефелиновых сиенитах последовательно возрастает от краев массива к его центру, в то время как железистость минерала увеличивается по мере приближения к Главному кольцу. Состав *титанита* из фойяитов в окрестностях Главного кольца близок к идеальному, титанит из краевой части массива обогащен алюминием и элементами, замещающими кальций (Sr, Na, REE), из центральной части – алюминием и ниобием, причем переход между этими составами осуществляется постепенно.

Состав однородного под электронным микроскопом *титаномагнетита* из фойяитов изменяется симметрично относительно Главного кольца, по мере приближения к которому суммарное содержание титана и марганца в магнетите возрастает от 5–15 до 40 ат. % за счет железа и ванадия. Содержание самого магнетита в фойяитах уменьшается по мере приближения к Главному кольцу, так что на расстоянии порядка 5 км от контактов с фойдолитами он практически исчезает, сменяясь ильменитом. Изучение закономерностей изменения состава аксессуарного *ильменита*

фойяитов показало, что вблизи Главного кольца происходит заметное возрастание содержания железа в его составе.

Содержание акцессорного *фторapatита* в фойяитах заметно увеличивается по мере приближения к Главному кольцу. При этом обогащенный Na, REE и Si фторapatит краевой и центральной частей массива при приближении к фойидолитовому кольцу освобождается от этих примесей в пользу стронция. Этот же процесс проявлен в зональности кристаллов фторapatита из рихчорритов, лявочорритов и приконтактовых с ними фойяитов, когда бесстронциевые ядра кристаллов образуют явно более поздними зонами с повышенным содержанием стронция.

Таким образом, Хибинский фойяитовый массив имеет достаточно четко выраженную петрографическую и геохимическую зональность, симметричную относительно Главного кольцевого разлома, выполненного мельтейгит-уртитам и апатито-нефелиновыми породами. Изменение химического состава большинства “сквозных” минералов (описанные плюс эвдиалит, лампрофиллит, содалит и др.) также происходит симметрично относительно этой разломной зоны, и многие тенденции, проявленные в фойяитах, прослеживаются далее в рихчорритах, фойидолитах и апатито-нефелиновых породах (Yakovenchuk et al., 2005). При этом формирование зональности массива не сводится к простому возрастанию или уменьшению содержания того или иного элемента – обычно имеют место процессы более или менее глубокой дифференциации. Так, по мере приближения к Главному кольцу содержание марганца возрастает в эвдиалите, но падает в ильмените и амфиболах; содержание калия возрастает в амфиболах, но уменьшается в полевом шпате и нефелине; содержание кальция возрастает в пироксенах и титаните, но уменьшается во фторapatите и амфиболах и т. д.

С учетом сведений о фрактальной геометрии апатитовых месторождений, топология которых полностью соответствует таковой трещин растяжения, и о характере древних и современных процессов тектонической разгрузки постоянно всплывающего Хибинского массива (Горяинов и др., 1998), становится ясным, что формирование рассматриваемой зональности происходило в результате процессов самоорганизации фойяитовой экструзии, инициированных заложением конического разлома в ее полностью консолидированном, всплывающем к поверхности и подвергающемся дилатансии теле и интродуцированием в этот разлом фойидолитового расплава.

Список литературы

Горяинов П. М., Иванюк Г. Ю., Яковенчук В. Н. Тектонические перколяционные зоны в Хибинском массиве // *Физика Земли*. 1998. № 10. С. 822–827.

Yakovenchuk V.N., Ivanjuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Men'shikov Yu.P. *Khibiny. Laplandia Minerals, Apatity*, 2005. 472 p.

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Коноплева Н.Г., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н. Структурно-вещественная организация Хибинского массива // *Петрология и рудоносность регионов СНГ и Балтийского щита. Том 3. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН*, 2005. С. 89–91.

Горяинов П. М., Иванюк Г. Ю. Самоорганизация минеральных систем. М., ГЕОС, 2001. 312 с.

Иванюк Г. Ю., Яковенчук В. Н., Горяинов П. М., Коноплева Н. Г., Пахомовский Я. А., Кривовичев С. В. *Природный минералогический автоклав // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т. 2. Полезные ископаемые, минералогия, петрология, геофизика. Апатиты: Изд. МУП “Полиграф”*, 2002. С. 91–103.