

УДК 552.33, 553.22/.23(470.21), 51-7

Е.Н. Козлов

Использование метода главных компонент для изучения процессов полиметасоматоза в контактах карбонатитовых комплексов Кольского полуострова

E.N. Kozlov

The principal component analysis for studying polymetasomatic processes in the contacts of carbonatitic complexes of the Kola Peninsula

Аннотация. Проведен статистический анализ выборки химических составов пород контактового ореола щелочно-ультраосновного карбонатитового массива Озерная Варака методом главных компонент. Выявлено три главных фактора, максимально повлиявших на изменение состава исследованных пород. Все три связаны с метасоматическими процессами, протекавшими в контактовом ореоле на различных этапах формирования комплекса – фойдолитового, карбонатитового и посткарбонатитового. Для каждого фактора произведена минералого-геохимическая интерпретация, результаты которой позволили подтвердить ряд выводов, сделанных ранее, и существенно их дополнить.

Abstract. The paper presents a statistical analysis of chemical compositions sampling of rocks from contact aureole of the alkaline-ultrabasic carbonatitic massif Ozernaya Varaka by the principal component method. Three main factors having the greatest influence on the rocks composition alteration have been identified. All the three are associated with metasomatic processes occurring in the contact aureole at various stages of the complex formation – foidolitic, carbonatitic and postcarbonatitic. Each factor has received its mineralogical and geochemical interpretation, the results of which allowed to confirm a number of conclusions made earlier, and significantly supplement them.

Ключевые слова: метасоматоз, метод главных компонент, щелочно-ультраосновные комплексы, фениты, карбонатиты, Озерная Варака

Key words: metasomatism, principal component method, alkaline-ultrabasic complexes, fenites, carbonatites, Ozernaya Varaka

1. Введение

Изучение петрохимических особенностей метасоматитов магматической стадии формирования интрузивных комплексов позволяет получить важную информацию о геохимическом характере мигрирующих растворов и их эволюции во времени, что, в свою очередь, обеспечивает более глубокое понимание механизмов формирования самих интрузивов. Основная сложность исследования пород из экзоконтактов многофазных массивов заключается в их полиметасоматической природе, которая затрудняет дискретную оценку геохимической специфики метасоматических преобразований на различных этапах становления. В полной мере это относится к щелочно-ультраосновным комплексам, большинство из которых является многофазными. В качестве объекта исследования был выбран один из плутонов девонской Кольской щелочной провинции – интрузив Озерная Варака. До момента внедрения магм щелочно-ультраосновного и карбонатитового состава породы обрамления массива Озерная Варака представляли собой петрохимически однородные биотит-олигоклазовые гранитогнейсы. Воздействие флюидной фазы, отделявшейся от магматического очага, повлекло за собой их преобразование в сложный комплекс породных разновидностей. Интенсивность наложенных процессов позволяет предполагать, что для пород контактового ореола основная дисперсия признаков (содержаний химических компонентов) обусловлена именно метасоматической переработкой в ходе нескольких этапов магматизма. В таком случае каждый этап сопряженного метасоматоза будет являться *фактором* – геологическим процессом, о параметрах которого можно судить по результатам его воздействия, отраженных в признаках объекта исследования. Математически это соответствует модели метода главных компонент (МГК), в основе которой лежит предположение, что k случайных переменных (исходных признаков) могут быть описаны совместной изменчивостью m числа факторов f ($m \leq k$) (Белонин и др., 1982). Данный метод позволяет, с одной стороны, сократить размерность исходного признакового пространства без нарушения его внутренней и внешней геометрической структуры, а с другой – произвести сравнительное изучение разных групп пород с целью вскрытия внутренней сущности их сходства или различия и выявить факторы, ответственные за эти сходства/различия. В совокупности это и определяет целесообразность и привлекательность использования МГК как инструмента изучения полиметасоматических образований.

2. Вещественный состав контактового ореола массива Озерная Варака

В настоящем разделе приводится лишь краткая информация о геологическом строении объекта изучения, необходимая для понимания сущности исследования. Более детальное описание вещественного состава контактового ореола массива Озерная Варака было изложено нами ранее (Козлов и др., 2014; Kozlov, Arzamastsev, 2015).

Массив Озерная Варака расположен в зоне сочленения Беломорского мегаблока и Имандра-Варзугского пояса карелид (юг Кольского полуострова). Вмещающие породы представлены неогарейскими средне- и мелкозернистыми биотит-олигоклазовыми гнейсами беломорского комплекса, среди которых в подчиненном количестве присутствуют биотит-амфиболовые гнейсы и гранат-плаггиоклазовые амфиболиты. Сам интрузив сформировался в девонское время в результате внедрения нескольких различных по составу порций магматического вещества (Kramm et al., 1993). Центральную часть массива Озерная Варака слагают щелочные ультрамафиты, главным образом нефелиновые пироксениты и мельтейгиты. Они окружены широким кольцом фойдолитов второй фазы внедрения, представленных преимущественно ийолитами. Породы данной фазы занимают более 60 % площади плутона на современном эрозионном срезе. К третьей фазе внедрения отнесены канкринитовые и канкринит-нефелиновые сиениты, представленные в виде немногочисленных жил мощностью 1-2 м, секущих пироксениты и фойдолиты. Наиболее поздними породами массива являются карбонатиты (преимущественно кальцитовые), которые наблюдаются в виде жильных и штокообразных тел. При небольших размерах самой интрузии (1.0×0.8 км) ширина ореола контактовых изменений достигает 300 и более метров, вследствие чего площадь, занимаемая экзоконтактовыми метасоматитами, сопоставима с площадью интрузивных образований.

Геолого-петрографическое изучение показало, что основной объем обрамляющих массив метасоматитов сформировался на фойдолитовом этапе становления комплекса – фенитизированных гнейсов и апогнейсовых фенитов. **Фенитизированные гнейсы** представляют собой кварцсодержащие существенно полевошпатовые породы с содержанием новообразованных минералов 25-30 %. Метасоматические изменения гнейсов выражаются в развитии амфибол-пироксеновых псевдоморфоз по биотиту и клинопироксеновых кайм вокруг зерен кварца, а также в замещении олигоклаза и биотита альбит-калишпатовым агрегатом. Наряду с первичными метаморфогенными структурами (сланцеватостью и полосчатостью), широко развиты участки коррозии, полностью сложенные новообразованными фазами и имеющие цепочечное или струйчатое распределение в породе. При переходе от фенитизированных гнейсов к **апогнейсовым клинопироксен-полевошпатовым фенитам** породы утрачивают гнейсовидность, текстура становится грубополосчатой, с чередованием лейко- (существенно полевошпатовых) и меланократовых (со значительным содержанием эгирин-авгита) слоев. На уровне минерального состава переход фиксируется по исчезновению кварца, олигоклаза, биотита и щелочных амфиболов, изменению состава клинопироксена, увеличению содержания К- и Na-полевых шпатов.

Наряду с метасоматитами фойдолитового этапа в пределах экзоконтактового ореола массива установлено присутствие пестрого набора более поздних разновозрастных гидротермально-метасоматических пород, чрезвычайно разнообразных по своему химическому составу, из которых наибольшее распространение имеют альбитизированные и волластонит-клинопироксеновые породы. В пределах участков развития **альбитизированных пород** среди фенитов наблюдаются лейкократовые жилы, прожилки, гнезда, сложенные преимущественно альбитом (75-80 об.%) и калиевым полевым шпатом (15 об.%), с подчиненным содержанием эгирин-авгита (5-10 об.%). Мощность жил и прожилок варьирует от первых миллиметров до первых десятков сантиметров. Подобные породы наблюдаются во всех исследованных разрезах как экзо-, так и эндоконтактов массива. Характерной чертой пород альбитизированных участков является заметное снижение содержания клинопироксена, вплоть до его полного исчезновения. Помимо того, резко снижается содержание типичных аксессуарных минералов апогнейсовых фенитов – апатита и титанита. Зона **волластонит-клинопироксеновых пород** мощностью 1-1.5 м располагается на юго-западном фланге массива непосредственно в контакте ийолитов с фенитизированными породами обрамления. Граница с приконтактовыми ийолитами резкая, секущая. Волластонит-клинопироксеновые породы характеризуются неоднородностью текстуры, обусловленной присутствием в эгирин-авгитовом матриксе множества маломощных (до 2 см) волластонитовых прожилок, шлиров и гнезд, в которых наблюдается до 10 об.% апатита. Примыкающие со стороны рамы фениты пронизаны сетью тонких прожилок, сложенных волластонитом, клинопироксеном, кальцитом, апатитом и титанитом.

Кроме того, в пределах контактового ореола установлено присутствие, по меньшей мере, трех разновидностей карбонатитов и силикокарбонатитов, различающихся по морфологии тел и вещественному составу. Две разновидности представлены монокарбонатными кальциокарбонатитами и одна – поликарбонатными феррокарбонатитами. Кальцитовые карбонатиты, в свою очередь, делятся по своим структурным особенностям на мелко- и среднезернистые альвикиты и крупно- и гигантозернистые сёвиты. **Альвикиты** слагают маломощные ветвящиеся жилы, окруженные фенитами, претерпевшими

еще один этап метасоматической переработки. Мощность жил и прожилков варьирует от первых сантиметров до первых дециметров, в редких случаях составляет более метра. Текстура пород разнообразная (массивная, такситовая, неяснополосчатая), структура преимущественно пойкилобластовая, реже – гранобластовая, средне- и мелкозернистая. Данные породы сложены несколькими минеральными ассоциациями: (а) [кальцит + волластонит + геденбергит + нефелин + титан-содержащий андрадит], (б) [кальцит + геденбергит + анортоклаз ± волластонит] и (в) [кальцит + эгирин-авгит ± биотит]. Основными акцессорными минералами для всех трех ассоциаций являются апатит и титанит. Во всех ассоциациях кальцит – доминирующий минерал, остальные минеральные фазы присутствуют в переменном количестве. Метасоматическая зональность вокруг жил альвикитов следующая (от оси жил): кальцитовый карбонатит → пироксен-кальцитовая порода → зона *твейтозитов* (основных метасоматитов, преимущественно – кальцит-пироксеновых ± нефелин ± биотит) → зона щелочных метасоматитов (альбитизированных пород, в которых "фенитовый" клинопироксен отчетливо корродируется). Вторую разность карбонатитов (*сёвиты*) составляют крупно- и гигантозернистые анхимономинеральные кальцитовые породы, слагающие достаточно мощные (до 3 м) дайкоподобные тела. Их минеральный состав очень однороден: 95-98 об.% кальцита и 2-5 об.% эгирин-авгита и флогопита. Данные карбонатиты установлены лишь на юго-восточном фланге массива, где они приурочены к единой зоне шириной 30 м. В пределах этой зоны фенитизированные гнейсы преобразованы в полнопроявленные метасоматиты, сходные по минеральному составу с фенитами фойдолитового этапа, однако за пределами зоны степень метасоматической переработки резко снижается уже на расстоянии нескольких метров. Самыми поздними из исследованных карбонатитов являются интенсивно ожелезненные поликарбонатные породы (*феррокарбонатиты*), секущие в виде единичных маломощных (первые дециметры) прожилков и жил замещения альвикиты.

3. Образцы для исследования и аналитические методики

В ходе исследования анализировались 34 выборочных значения девятимерного вектора признаков. В качестве последних использовались содержания петрогенных компонентов за вычетом летучих. Летучие компоненты анализировались в качестве вспомогательных переменных, не принимавших участия в вычислениях (также как и вспомогательные наблюдения), но впоследствии спроецированных в пространство факторных осей (главных компонент), образованное переменными и наблюдениями анализа. Концентрации компонентов определялись в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН атомно-абсорбционным (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_T , MgO , CaO , MnO), эмиссионным (K_2O , Na_2O), колориметрическим (TiO_2 , P_2O_5), ионометрическим (F, Cl), объемным (CO_2 , FeO_T) и весовым (S_T , H_2O^+ , H_2O^-) методами. Измерения проводили на основе одной навески породы после разложения ее сплавлением с бурой и содой. Точность определений составила не ниже $\pm 1.5\%$ для концентраций $>10\%$ и $\pm 3.5\%$ для концентраций $>1\%$. В выборку были включены составы неизмененных (6 анализов) и фенитизированных гнейсов (4 анализа), апогнейсовых фенитов (11 анализов), альбитизированных пород (4 анализа) и твейтозитов (8 анализов). При расчетах учитывался и единичный анализ химического состава волластонит-клинопироксеновых пород, а в качестве вспомогательных наблюдений – 13 анализов карбонатитов всех выделенных разновидностей. К сожалению, рамки настоящей публикации не позволяют привести полностью петрохимические параметры образцов пород, послужившие основой для приведенных далее вычислений. Метод главных компонент, задействованный при исследовании выборки пород контактового ореола массива Озерная Варака, применялся с использованием программы статистической обработки данных STATISTICA 6.0 при учете рекомендаций, изложенных в работах (Белонин и др., 1982; Ким и др., 1989; Халафян, 2007). Критерий выборочной адекватности Кайзера-Мейера-Олкина и критерий сферичности Бартлетта были рассчитаны при помощи программы статистической обработки информации SPSS 17 (Наследов, 2011).

4. Результаты статистической обработки петрохимических характеристик метасоматитов контактового ореола массива Озерная Варака методом главных компонент

Так как переменные (компоненты) различаются порядком величин, то основой для компонентного анализа послужила не ковариационная матрица, а выборочная матрица параметрических коэффициентов корреляции Пирсона. Необходимо отметить, что p -уровень для большинства элементов данной матрицы > 0.05 , т.е. они не значимы. С целью подтверждения гипотезы о целесообразности применения факторной модели по отношению к данному набору переменных были рассчитаны критерий выборочной адекватности Кайзера-Мейера-Олкина и критерий сферичности Бартлетта. Критерий выборочной адекватности Кайзера-Мейера-Олкина (*measure of sampling adequacy – MSA*) основан на сравнении значения наблюдаемых коэффициентов корреляции со значениями частных коэффициентов корреляции (Ким и др., 1989; Rencher, 2002) и является эмпирическим. Для него отсутствуют статистические таблицы значимости, однако принимается, что при $MSA > 0.5$ факторный анализ применим к выборке. Для анализируемых данных величина $MSA = 0.60$, что свидетельствует об адекватности факторной модели по

отношению к анализируемому набору переменных. Для оценки значимости всей корреляционной матрицы применяется тест сферичности Бартлетта (Иберла, 1980). Для исследуемой выборки рассчитанная статистика $\chi^2 = 473.70$ при 36 степенях свободы, что позволяет принять альтернативную гипотезу о значимости всей корреляционной матрицы на уровне $p \ll 0.05$, что так же подтверждает целесообразность проведения факторного анализа.

В результате ортогонального преобразования матрицы было получено девять факторов, расположенных в таблице в порядке убывания собственных значений. На основе изучения степеней свободы для критерия значимости можно заключить, что максимальное число информативных факторов в анализе девяти переменных ограничивается пятью (Ким и др., 1989). Задача о нахождении минимального количества факторов, обеспечивающих согласие с наблюдениями, решается многими способами. Согласно наиболее широко применяемому критерию Кайзера (Kaiser, 1960), если фактор не выделяет дисперсию, эквивалентную, по крайней мере, дисперсии одной переменной ($\lambda_j < 1.0$), то он исключается из рассмотрения. Из девяти выделенных факторов только два (ΦI и ΦII) удовлетворяют данному условию. Критерий Кайзера определяет минимальное число значимых факторов (Ким и др., 1989).

Таблица. Матрица факторных нагрузок, собственные значения (λ_j) и веса факторов

Переменные	ΦI	ΦII	ΦIII	ΦIV	ΦV	ΦVI	ΦVII	$\Phi VIII$	ΦIX
SiO ₂	-0.876	0.250	-0.338	0.142	0.142	0.105	-0.045	0.021	-0.024
TiO ₂	0.797	-0.465	-0.030	0.282	0.179	-0.175	-0.070	0.015	-0.001
Al ₂ O ₃	-0.897	-0.363	0.171	0.129	-0.039	-0.049	0.041	-0.110	-0.015
FeO _T	0.906	-0.324	0.051	0.078	0.161	0.159	0.116	0.030	-0.007
MnO	0.882	0.246	0.187	-0.244	0.227	0.077	-0.058	-0.080	-0.003
MgO	0.798	-0.494	-0.151	-0.073	-0.248	0.153	-0.070	-0.011	-0.008
CaO	0.921	0.282	0.119	-0.133	-0.112	-0.163	0.026	0.030	-0.027
Na ₂ O	-0.780	-0.175	0.590	-0.023	0.017	0.071	-0.052	0.067	-0.006
K ₂ O	-0.697	-0.486	-0.204	-0.463	0.120	-0.084	0.012	0.022	-0.003
λ_j	6.385	1.166	0.609	0.420	0.220	0.138	0.034	0.026	0.002
Вес фактора, %	70.95	12.96	6.77	4.67	2.45	1.53	0.38	0.29	0.02
P ₂ O ₅	0.704	0.536	0.227	-0.149	0.033	-0.290	0.087	-0.001	-0.034
CO ₂	0.482	0.333	0.451	-0.311	-0.078	-0.161	0.138	-0.101	0.334
S _T	0.581	-0.132	0.092	0.349	0.352	-0.210	-0.119	0.028	-0.112
Cl	0.365	-0.302	-0.028	0.358	0.145	-0.219	0.199	-0.036	-0.278
F	0.681	-0.488	-0.202	0.094	-0.019	-0.103	0.024	-0.120	-0.009
H ₂ O ⁺	-0.116	-0.015	0.056	-0.040	0.007	-0.070	-0.184	-0.031	-0.196

Примечание. Ниже двойной черты приведены факторные нагрузки для вспомогательных переменных. Факторные нагрузки являются значимыми ($p = 0.05$) при их абсолютном значении ≥ 0.34 .

Еще одним, часто используемым на практике, является эмпирический критерий, основанный на оценке вклада собственных векторов в суммарную дисперсию (Белонин и др., 1982). Расчет вклада каждой из компонент в описание исходных данных производится по формуле

$$\frac{\lambda_j}{\sum \lambda_j} = \frac{\lambda_j}{tr(R)}, \text{ где } tr(R) \text{ – след матрицы корреляций } R.$$

Эта величина носит название *относительной дисперсии* или *веса фактора* и выражается в процентах. Малозначимыми признаются (и отбрасываются) те факторы, чей вес составляет менее 5%. Согласно данному критерию, значимыми являются три фактора (ΦI , ΦII и ΦIII), которые и подверглись дальнейшему анализу.

5. Обсуждение результатов

Проведенный анализ матрицы факторных нагрузок (табл. 1) показал, что первый фактор (ΦI , **фактор метасоматоза карбонатитового этапа**) по своей признаковой структуре является генеральным, так как характеризуется значимыми факторными нагрузками во всех основных и в подавляющем большинстве вспомогательных переменных (Белонин и др., 1982). Весомость данного фактора (71.0 % относительной дисперсии) определяется тем, что в исследуемой выборке присутствуют контрастные по своему составу щелочные метасоматиты и базификаты. Значения данного фактора для всех щелочных метасоматитов и их протолита (группы неизмененных и фенитизированных гнейсов, апогнейсовых фенитов, альбитизированных пород) меньше либо близки к 0, в то время как для базификатов

(твейтозитов) они лежат в диапазоне [2, 6]. Необходимо отметить, что альбитизированные породы из всех выделенных групп алюмосиликатных пород экзоконтакта максимально смещены к отрицательному полюсу фактора ΦI . Данный фактор имеет разнонаправленное действие. В качестве антагонистов выступают "компоненты мафических минералов", включая летучие (Ca, Fe, Mn, Mg, Ti, P, F, S, CO₂, Cl) и "компоненты фельзитовых минералов" (Na, K, Al, Si). Таким образом, данный фактор на минералогическом уровне можно интерпретировать как фактор изменения цветового индекса пород, который остается постоянным в процессе метасоматических преобразований фойдолитового этапа, а при карбонатитовом метасоматозе резко возрастает в породах зон базификации и снижается в зонах вторичного ошелачивания. На геохимическом уровне изучения ΦI является фактором, противопоставляющим основной метасоматоз щелочному.

Второй по своему весу (13.0 %) фактор ΦII . Сопоставление значений данного фактора для алюмосиликатных пород экзоконтакта показало, что процесс, обусловивший его появление, в первую очередь проявился в формировании двух разновидностей твейтозитов: железо-магниевого и кальциевого. Для первой разности значения факторов попадают в диапазон [-2.7, -1.4], а для второй – в диапазон [0.1, 0.8]. Фигуративные точки наблюдений каждой из групп неизменных и фенитизированных гнейсов, фенитов и альбитизированных пород распределяются по обе стороны от нуля в пределах отрезка [-1.3, 0.7], что говорит о малой значимости ΦII в их формировании. Относительно силикатных пород максимальное влияние данного фактора проявлено в химическом составе волластонит-клинопироксеновых (факторная координата по ΦII 3.9). Необходимо отметить, что у всех наблюдений карбонатитов значение данного фактора также выше нуля: у феррокарбонатитов – 0.4-0.5, у альвикитов – 1.3-3.2, у сёвитов – 3.7-4.10. Признаковая структура фактор ΦII определяется его разнонаправленным воздействием на (Mg, F, K, Ti, Al) и P. Первая группа компонентов характеризуется обратной корреляцией с фактором, а фосфор – прямой. Факторными нагрузками ≈ 0.3 , близкими к пороговому уровню, но не достигающими его, также обладают Fe (обратная корреляция с ΦII), CO₂ и Ca (прямая корреляция). Геохимически данный фактор может быть описан в виде двух процессов: основного кальциевого метасоматоза при высоких потенциалах P₂O₅ и CO₂ (положительный полюс фактора) и калиевого щелочного метасоматоза при высоком потенциале F (отрицательный полюс фактора). На минералогическом уровне это можно проинтерпретировать сопряженными процессами карбонатизации и апатитизации (отрицательный полюс фактора), связанными с вовлечением вещества из карбонатитового источника, и биотитизации (положительный полюс фактора). Таким образом, первые два и третий процессы являются антагонистами. Полевые наблюдения (например, секущее положение поздних биотитовых слюдитов относительно волластонит-клинопироксеновых пород) позволяют предполагать, что процесс ослюденения был относительно более поздним. По всей видимости, фактор ΦII отражает то, насколько интенсивно затушеваны минеральные карбонатитовые метки наложенными посткарбонатитовыми процессами, воздействие которых отражается в смещении фигуративных точек наблюдений к отрицательному полюсу фактора. В связи с этим ΦII может быть проинтерпретирован как **фактор посткарбонатитовых наложенных процессов**, в первую очередь отразившийся на твейтозитах.

Третий по значимости фактор (ΦIII , **фактор метасоматоза фойдолитового этапа**), описывающий всего 6.8 % общей дисперсии, имеет простую признаковую структуру, выражающуюся в разнонаправленном воздействии на Na и CO₂ с одной стороны и SiO₂ – с другой. Геохимически это описывается двумя процессами – накоплением Na (натриевым щелочным метасоматозом) на фоне высокого потенциала CO₂ и одновременным выносом SiO₂ (десилификации). Результат влияния данного фактора отображается в закономерном смещении фигуративных точек наблюдений к положительному полюсу по мере увеличения степени метасоматической переработки (от неизменных гнейсов через фенитизированные гнейсы к апогнейсовым фенитам). Значения фактора ΦIII для проб твейтозитов попали в диапазон значений для составов фенитизированных гнейсов и фенитов, которые и послужили для твейтозитов протолитом.

В рамках настоящего исследования наибольший интерес представляет факторная плоскость в координатах факторов ΦI – ΦIII , отражающая комплексное воздействие метасоматических процессов фойдолитового и карбонатитового этапов. На рис. 1А на данную плоскость спроецированы переменные (как основные, так и вспомогательные). Основываясь на анализе фигуративных точек переменных, можно сделать следующее заключение:

- основные переменные практически полностью воспроизводятся текущим набором выделенных факторов;
- из вспомогательных переменных относительно полно воспроизводятся P₂O₅, F и CO₂;
- большинство "мафических компонентов", расположившихся в I и IV квадрантах факторной плоскости, за исключением CO₂, ведут себя согласованно, тесно связаны с положительным полюсом ΦI и не коррелируются с ΦIII ;

- из "фельзитовых компонентов" согласованно изменяются K_2O и SiO_2 , тяготеющие к отрицательному полюсу ΦI и характеризующиеся слабой отрицательной корреляционной связью с ΦIII (III квадрант);
- фигуративные точки Na_2O и Al_2O_3 расположились во втором квадранте, причем Na_2O коррелируется как с фактором ΦI , так и с ΦIII , а Al_2O_3 – преимущественно с ΦI .

Проекция наблюдений на факторную плоскость позволяет выделять группы сходных индивидуумов по близости расположения фигуративных точек факторных координат, а также оценить их взаимосвязь с переменными (Йёреског и др., 1980). На диаграмме рассеивания в координатах значений факторов ΦI – ΦIII фигуративные точки неизменных и фенитизированных гранитогнейсов, разделившись, легли в области переменных K_2O и SiO_2 – III квадрант (рис. 1Б), что согласуется с их петрохимическими особенностями (данные группы пород из всей анализируемой выборки максимально обогащены данными компонентами). Данный квадрант является областью слабо проявленного метасоматоза. Апогнейсовые фениты и альбитизированные породы за исключением одной фигуративной точки распределились в области Na_2O и Al_2O_3 , а твейтозиты и волластонит-клинопироксеновая порода сгруппировались вблизи переменных (MgO , FeO_T , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , F). На ту же факторную плоскость были спроецированы и вспомогательные наблюдения, не участвовавшие в предварительных расчетах, – составы альвикитов, сёвитов и феррокарбонатитов. Их фигуративные точки закономерно разместились вблизи переменных CO_2 и P_2O_5 .

Анализ распределения факторных координат наблюдений показал, что (а) фигуративные точки групп неизменных и фенитизированных гнейсов, фенитов, твейтозитов и альбитизированных пород размещаются в неперекрывающихся полях и (б) факторные координаты наблюдений нескольких разновидностей пород линейно зависимы. В пяти разновидностях, охарактеризованных 5 и более наблюдениями (неизменных гнейсах, апогнейсовых фенитах, твейтозитах, сёвитах и альвикитах), эту зависимость удалось описать уравнениями регрессии с коэффициентами детерминации $R^2 \geq 0.7$ (рис. 1Б), при уровнях значимости $p \leq 0.04$. Следует отметить, что для твейтозитов расчеты выполнялись по 7, а не 8 наблюдениям, имеющимся в выборке. При вычислениях была исключена точка с факторными координатами (2.12, 0.70), далеко отстоящая от кластера, что ставит под вопрос принадлежность данного образца к твейтозитам. Значения факторов ΦI и ΦIII для наблюдений гранитогнейсов, фенитов и твейтозитов связаны прямой линейной зависимостью с близкими коэффициентами регрессии (0.62, 0.68 и 0.63). Это свидетельствует о единой природе распределения фигуративных точек в рамках данных групп. Так как данные породы имеют метасоматический генезис, эта простая зависимость "чем интенсивней проявлен фактор ΦI , тем сильнее проявлен фактор ΦIII ", вероятней всего, определяется параметром восприимчивости метасоматической переработки – флюидопроницаемостью образцов (их эффективной пористостью и микротрещиноватостью).

Требуется объяснения то, что данной зависимостью характеризуются и породы, по петрографо-минералогическим признакам не подвергавшиеся метасоматической переработке в результате формирования массива неизменных гнейсов. Необходимо напомнить, что квадрант слабо проявленного метасоматоза отвечает области переменных K_2O и SiO_2 . При этом по фактору ΦI щелочной полевошпатовый метасоматоз противопоставляется базификации, а по фактору ΦIII калиевый метасоматоз – натриевому. При полевом изучении была установлена неравномерно проявленная микроклинизация неизменных гнейсов, причина которой может трактоваться двойственно. Она может являться результатом типичного для гнейсов простого (одноактного) метасоматоза в ходе регионально метаморфического преобразования и не быть связанной с магматической активизацией, либо/и представлять собой продукт фиксации кремнезема и калия, выносящихся из тыловых частей контактового ореола в результате реализации конкурирующих с калишпатовым метасоматозом процессов фенитизации и базификации. Независимо от природы калишпатизации, интенсивность ее проявленности, по всей видимости, также контролировалась флюидопроницаемостью гранитогнейсов, которую наследовали и продукты их метасоматического преобразования – фениты и твейтозиты.

Фигуративные точки сёвитов формируют компактное поле, вытянутое вдоль оси первого ("карбонатитового") фактора, о чем свидетельствует малое значение коэффициента уравнения регрессии, равное 0.15. Это указывает на незначительность фактора ΦIII в формировании данной разновидности пород. Факторные координаты альвикитов, среди которых, в отличие от сёвитов, преимущественно распространены силикокарбонатиты, также линейно зависимы, однако построенная для них линия регрессии имеет отрицательный наклон (коэффициент регрессии – 0.363). Следовательно, процесс, в ходе которого образовались альвикиты, связан с обоими факторами, но связь имеет специфический вид "чем больше влияние ΦI , тем меньше влияние ΦIII ". Этот вывод согласуется с моделью формирования данного типа пород за счет ассимиляции карбонатитовым расплавом в ходе магматического замещения фенитов, с которыми альвикиты имеют сходный диапазон факторных координат по оси ΦIII .

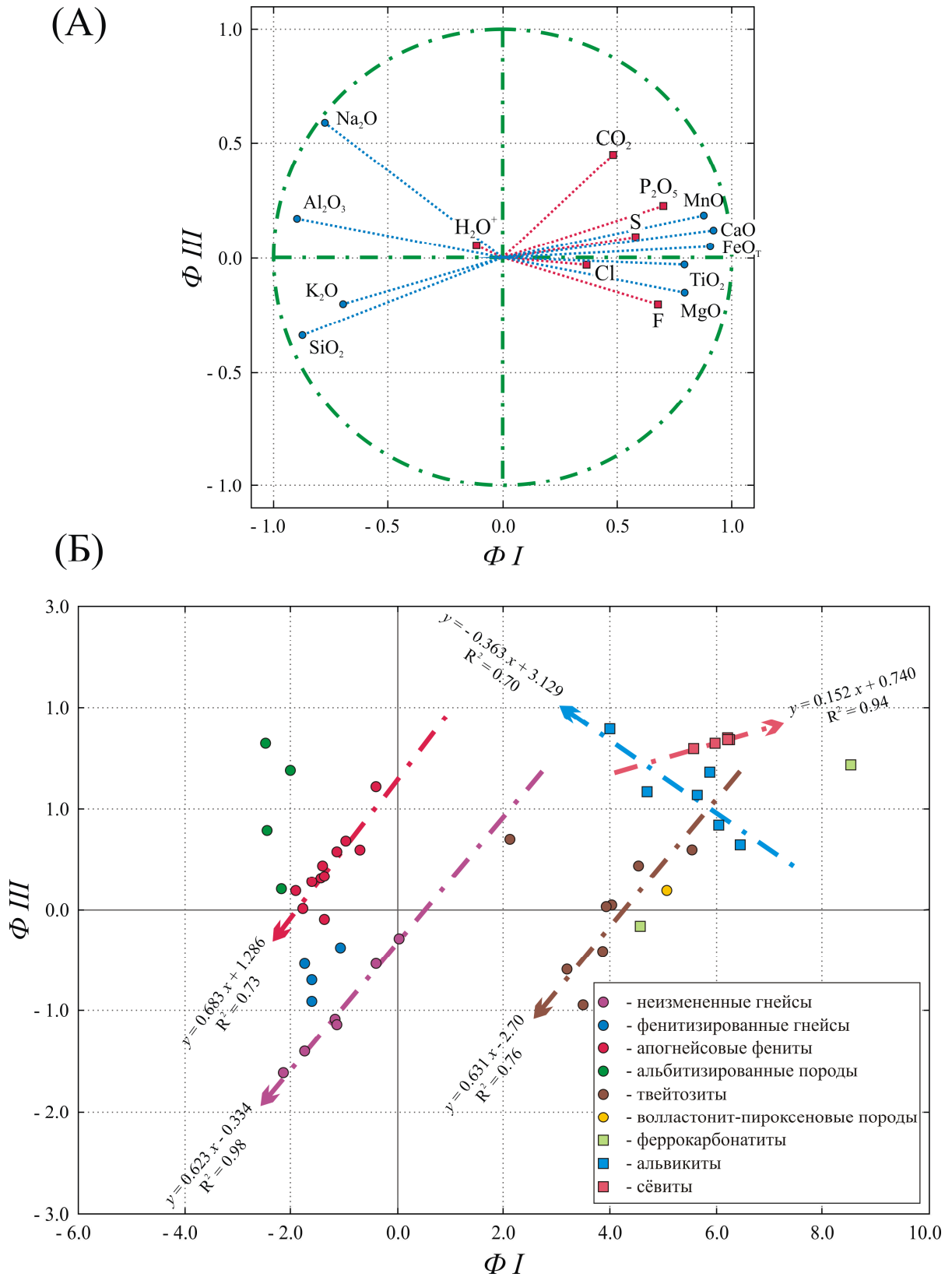


Рис. 1. Проекция (А) переменных и (Б) наблюдений на факторную плоскость $\Phi I - \Phi III$. На рисунке (А) приведены проекции как основных (синие круги), так и вспомогательных (красные квадраты) переменных. На диаграмме (Б) штрих-пунктирными прямыми указаны линии регрессии. Для каждой приведены уравнения прямых и значения коэффициентов детерминации. Линия регрессии по фигуративным точкам твейтозитов рассчитана без учета "аномальной" точки (2.12, 0.70)

В заключении необходимо уделить внимание вопросу о параметрах распределения компонентов, использованных для анализа и, в частности, о соответствии их распределения многомерному нормальному. В последнем случае переменные, по меньшей мере, должны быть распределены нормально и коррелироваться между собой. Строго говоря, факторная модель не требует предположения о многомерной нормальности закона распределения исследуемых переменных (Ким и др., 1989), а МГК может быть использован даже в том случае, когда переменные не являются случайными величинами (Белонин и др., 1982). Однако в силу некоторой неопределенности результата нарушения допущения о многомерной нормальности, исходные данные были проанализированы на предмет характера распределения исследовавшихся компонентов. На основе визуальной оценки нормальных вероятностных графиков и гистограмм для переменных TiO_2 , FeO_T , MnO , CaO , P_2O_5 , CO_2 , S , Cl , F и H_2O^+ установлено, что они подчиняется не нормальному, а логнормальному закону распределения. p -уровень для большинства элементов матрицы корреляции исходных величин > 0.5 , что в совокупности свидетельствует о выраженном нарушении многомерного нормального распределения.

Преобразования распределений перечисленных компонентов к нормальному виду выполнялись по формуле $z_i = \ln(x_i)$, где x_i – исходное содержание i -го компонента из приведенной выше группы. Распределение преобразованных переменных z_i может быть аппроксимировано нормальным, о чем свидетельствуют визуальная проверка гистограмм и p -уровни D -статистик Колмогорова-Смирнова, меньшие 0.20. Путем замены x_i на соответствующие z_i из исходной матрицы данных была получена преобразованная матрица данных. Для всех элементов ее корреляционной матрицы p -уровень значимости ниже 0.05, также как и p -уровень всей корреляционной матрицы, оцененный по критерию сферичности Бартлетта ($\chi^2 = 367.39$ при 36 степенях свободы, $p \ll 0.05$). Рассчитанная величина $MSA = 0.78$, что свидетельствует о более высокой адекватности факторной модели по отношению к преобразованным переменным, чем к исходным. Несмотря на "улучшение" статистических показателей, полученные результаты на качественном уровне оказались чрезвычайно близки. Заметное различие между диаграммами рассеяния в координатах $\Phi I - \Phi III$ (рис. 1Б) и $\Phi^* I - \Phi^* III$ (рис. 2) заключается лишь в положении фигуративной точки волластонит-клинопироксеновых пород, сместившейся от оси $\Phi^* I$ к положительному полюсу $\Phi^* III$ в область карбонатитов. Таким образом, нарушение допущения о многомерной нормальности распределения, как и предполагалось, не оказало существенного влияния на полученный результат, что оставляет в силе все сделанные выше выводы.

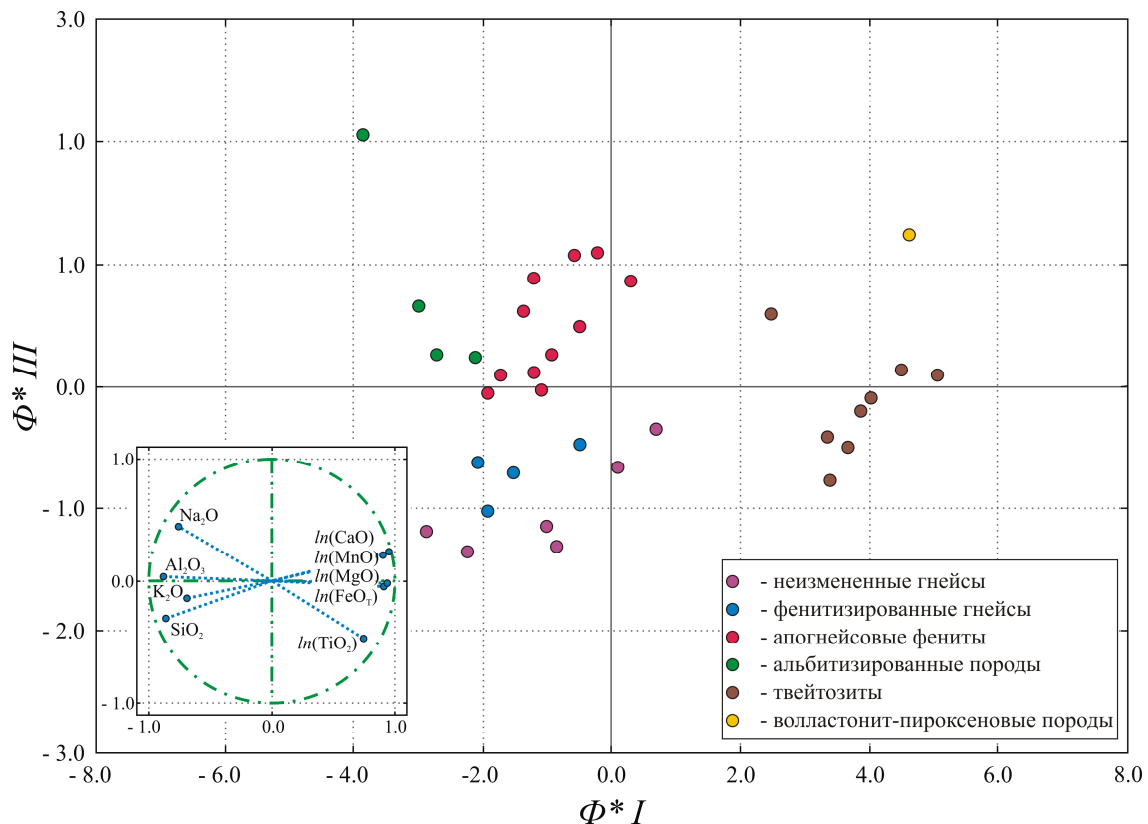


Рис. 2. Проекция наблюдений на факторную плоскость $\Phi^* I - \Phi^* III$. На врезке – проекции преобразованных переменных на ту же факторную плоскость. Для упрощения на диаграмму вынесены фигуративные точки только основных переменных и наблюдений

6. Заключение

Использование метода главных компонент позволило выделить три процесса (фактора), максимально повлиявших на изменение состава исследованных пород:

1) **метасоматоз карбонатитового этапа** (фактор ΦI). На геохимическом уровне изучения данный процесс реализуется в формировании по ранним щелочным метасоматитам двух типов пород – базификатов, в которые привносились (Ca, Fe, Mn, Mg, Ti, P, F, S, CO₂, Cl) и из которых выносились (Na, K, Al, Si), и альбитизированных пород, в которые привносилась вторая группа элементов. На петрографо-минералогическом уровне этот процесс связан с цветовым индексом пород, который остается постоянным в процессе метасоматических преобразований фойдолитового этапа, а при карбонатитовом метасоматозе резко возрастает в породах зон базификации и снижается в зонах вторичного ошелачивания;

2) **наложенные посткарбонатитовые изменения твейтозитов** (фактор ΦII). Геохимически это процесс, ведущий к "затушевыванию" признаков воздействия основного кальциевого метасоматоза, протекавшего при высоких потенциалах P₂O₅ и CO₂, в ходе наложенного калиевого щелочного метасоматоза при высоком потенциале F. На минералогическом уровне данный процесс выражается в антагонизме карбонатизации и апатитизации с одной стороны и биотитизации – с другой;

3) **метасоматоз фойдолитового этапа** (фактор ΦIII) оказал противоположное воздействие на (Na₂O, CO₂) и SiO₂. Геохимически это описывается двумя сопряженными процессами – накоплением Na (натриевым щелочным метасоматозом) на фоне высокого потенциала CO₂ и одновременным выносом SiO₂ (десицификации).

Анализ положения фигуративных точек разновидностей пород на факторной плоскости $\Phi I - \Phi III$ выявил ряд различий, обусловленных, по всей видимости, их генезисом:

(а) распределения фигуративных точек неизменных гнейсов, апогнейсовых фенитов и твейтозитов имеют единую природу и связаны параметром, определяющим индивидуальную восприимчивость образцов к метасоматической переработке, – их флюидопроницаемостью (эффективной пористостью и микротрещиноватостью);

(б) характер распределения фигуративных точек сёвитов указывает на незначительность фактора ΦIII в образовании данной разновидности пород, что увязывается с представлением об их магматическом или карботермалитовом происхождении;

(в) распределение фигуративных точек альвикитов согласуется с моделью формирования данного типа пород за счет ассимиляции карбонатитовым расплавом в ходе магматического замещения фенитов.

Результаты проведенного исследования петрохимических параметров пород контактового ореола массива Озерная Варака с применением метода главных компонент согласуются с ранее сделанными выводами, полученными на основе детального изучения минералогии и геохимии данных пород (Kozlov, Arzamastsev, 2015), и дополняют их. Столь высокая информативность полученных результатов в совокупности с их наглядностью свидетельствуют об эффективности привлечения метода главных компонент в качестве инструмента исследования сложных полиметасоматических объектов.

Благодарности. Автор благодарен сотрудникам химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН за выполненные полные силикатные анализы исследованных пород. Критические замечания к. г.-м. н. Д.Г. Степенщикова и Е.В. Мартынова (ГИ КНЦ РАН) оказались весьма конструктивными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 15-35-50265).

Литература

- Kaiser H.F. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological Measurement. 1960. V. 20, N 1. P. 141-151.
- Kozlov E.N., Arzamastsev A.A. Petrogenesis of metasomatic rocks in the fenitized zones of the Ozernaya Varaka alkaline ultrabasic complex, Kola Peninsula. Petrology. 2015. V. 23, N 1. P. 45-67.
- Kramm U., Kogarko L.N., Kononova V.A., Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380-360 age range for all magmatism. Lithos. 1993. V. 30, N 1. P. 33-44.
- Rencher A.C. Methods of multivariate analysis. N.Y., John Wiley & Sons, 2002. 738 p.
- Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М., Недра, 1982. 269 с.
- Иберла К. Факторный анализ. М., Статистика, 1980. 398 с.
- Йёреског К.Г., Клован Д.И., Реймент Р.А. Геологический факторный анализ. Л., Недра, 1980. 223 с.

- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др.** Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М., Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Козлов Е.Н., Арзамасцев А.А., Базай А.В.** Типохимизм минералов из пород контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов как индикатор полиметасоматической переработки: на примере массива Озерная Варака (Кольский полуостров). Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 286-303.
- Наследов А.** SPSS 19: профессиональный статистический анализ данных. СПб., Питер, 2011. 400 с.
- Халафян А.А.** STATISTICA 6. Статистический анализ данных. Учебник. М., ООО "Бином-Пресс", 2007. 512 с.

References

- Belonin M.D., Golubeva V.A., Skublov G.T.** Faktornyiy analiz v geologii [Factor analysis in geology]. M., Nedra, 1982. 269 p.
- Iberla K.** Faktornyiy analiz [Factor analysis]. M., Statistika, 1980. 398 p.
- Yyoreskog K.G., Klovon D.I., Reyment R.A.** Geologicheskiy faktornyiy analiz [Geological factor analysis]. L., Nedra, 1980. 223 p.
- Kim Dzh. O., Myuller Ch.U., Klekka U.R. i dr.** Faktornyiy, diskriminantnyiy i klasterniy analiz [Factor, discriminant and cluster analysis]. M., Finansy i statistika, 1989. 215 p.
- Kozlov E.N., Arzamastsev A.A., Bazay A.V.** Tipohimizm mineralov iz porod kontaktovyih oreolov shchelochno-ultraosnovnyih kompleksov kak indikator polimetasomaticheskoy pererabotki: na primere massiva Ozernaya Varaka (Kolskiy poluostrov) [Typochemistry of the minerals in the contact aureole rocks of the alkaline-ultrabasic complexes as an indicator of a polymetasomatic alteration: Case study of the Ozernaya Varaka massif (the Kola Peninsula)]. Vestnik MGTU. 2014. T. 17, N 2. P. 286-303.
- Nasledov A.** SPSS 19: professionalnyiy statisticheskiy analiz dannyih [professional statistical analysis]. SPb., Piter, 2011. 400 p.
- Halafyan A.A.** STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannyih [Statistical analysis of data]. Uchebnik. M., ООО "Binom-Press", 2007. 512 p.

Информация об авторе

Козлов Евгений Николаевич – Апатитский филиал МГТУ, кафедра геологии и полезных ископаемых, ст. преподаватель; Геологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник, e-mail: kozlov_e.n@mail.ru

Kozlov E.N. – MSTU Apatity Branch, Geology and Minerals Department, Senior Lecturer; Geological Institute KSC RAS, Junior Researcher, e-mail: kozlov_e.n@mail.ru