

БИМЕТАСОМАТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВЫХ И СИЛИКАТНО-КАРБОНАТНЫХ ПОРОД: ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И КИНЕТИКА ДИФфуЗИИ ЩЕЛОЧЕЙ

В.Ю. Скрыбин, Т.Н. Полякова

Воронежский государственный университет

Изучена биметасоматическая зональность, наблюдаемая между цементом и гальками метаморфизованных полимиктовых конгломератов. Установлено, что метаморфические преобразования пород были вызваны контактово-термальным воздействием внедрявшейся Роговской интрузии и протекали при давлении около 2 кбар и температуре 450–540 °С. Выявлено, что состав минеральных парагенезисов реакционных зон и направленность диффузии компонентов определяются спецификой химического состава реагирующих сред. Определены факторы, влияющие на закономерности изменения состава минеральных фаз и симметричность строения биметасоматических колонок. Оценено соотношение коэффициентов диффузии K_2O и Na_2O ($\approx 1,3$) при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред.

Метасоматические процессы принимают участие в формировании большинства эндогенных рудных месторождений, что определяет необходимость их детального исследования. Частным случаем этих процессов является биметасоматоз, обусловленный физико-химическим взаимодействием сред различного состава. Современный подход к его изучению во многом основывается на разработанной Д.С. Коржинским [1–3] теории метасоматических процессов, нашедшей свое дальнейшее развитие в работах как отечественных, так и зарубежных исследователей [4–12].

Все исследования биметасоматических процессов в предшествующие годы проводились на объектах двух типов: в контактовых, так называемых «диффузионных» скарнах на границе карбонатных и интрузивных пород и в регионально метаморфизованных толщах на стратиграфических контактах пород различного литологического состава. Они рассматривали главным образом вопросы динамики, то есть направленности биметасоматических процессов, и были посвящены анализу фазовых равновесий, влиянию на них РТ-параметров, химической активности H_2O , CO_2 и других летучих и вполне подвижных компонентов, а также поведению изотопов стронция, кислорода, углерода [13, 14] и роли окислительно-восстановительных условий [15]. Однако результаты этих исследований практически не затрагивали кинетику образования биметасоматической зональности. Сложность оценки кинетических параметров обусловлена, во-первых, отсутствием данных о продолжительности протекания биметасоматоза, что, впрочем, касается подавляющего большинства геологических процессов, во-вторых, неясностью соотношения масштабов диффузионного и инфильтрационного массопереноса, что особенно характерно для формирования контактовых скарнов, и, в-третьих, неопределенностью самой природы реакционных зон, что типично для стратиграфических контактов, поскольку наличие промежуточных по

составу пород может быть обусловлено как диффузионным массообменом, так и исходным присутствием здесь переходных литологических разновидностей и их последующим изохимическим метаморфизмом. Поэтому очевидно, что решение вопросов кинетики биметасоматических процессов требует как выбора других объектов исследования, так и иного методологического подхода.

В настоящей работе авторы предлагают использовать для оценки кинетических параметров диффузионного массопереноса биметасоматическую зональность, возникающую при метаморфизме химически гетерогенных сред. Под подобными химически гетерогенными средами нами понимаются породы, в различных участках которых при одних и тех же РТ-параметрах возникают неравновесные по отношению друг к другу минеральные ассоциации, между которыми в результате встречной диффузии компонентов формируется биметасоматическая зональность. Наиболее ярким примером химически гетерогенных пород являются конгломераты, для которых характерно наличие четких, резких границ между различными по химизму составными частями породы, идентичность агрегатного состояния реагирующих сред, а также однозначно диффузионный характер массопереноса при их взаимодействии. В случае полимиктового состава метаконгломератов появляется возможность изучения небывалого многообразия биметасоматического взаимодействия сред, а при разной степени метаморфизма пород – и влияния температурных условий на кинетику диффузионных процессов.

Геологическая характеристика объекта

Подобные полимиктовые конгломераты присутствуют среди терригенно-карбонатных пород и метаэффузивов, выполняющих все раннепротерозойские рифтогенные структуры западной части Воронежского

кристаллического массива. Нами были изучены метаконгломераты, расположенные в юго-западном крыле средней части Тим-Ястребовской структуры, где они слагают основание разреза тимской свиты и вскрыты рядом скважин в различных зонах контактово-термального ореола Роговской интрузии (рис. 1). Степень их метаморфизма по простираанию меняется от зеленосланцевой до верхов эпидот-амфиболитовой фации [16–18]. Залегание пород субвертикальное, что фиксируется как наблюдаемой слоистостью, проявленной в гранулометрическом и вещественном составе цемента, так и ориентировкой удлинения галек.

Цемент полимиктовых конгломератов базальный, зеленовато-темно-серый, обычно мелкозернистый, в отдельных прослоях – среднезернистый. В большинстве случаев он имеет алюмосиликатный высококальциевый, а в отдельных прослоях – силикатно-карбонатный состав. Гальки характеризуются хорошей степенью окатанности, но в одних случаях имеют округлую, эллипсоидную форму, а в других – сильно уплощены и вытянуты вдоль сланцеватости, что обусловлено как составом галек, так и интенсивностью деформации

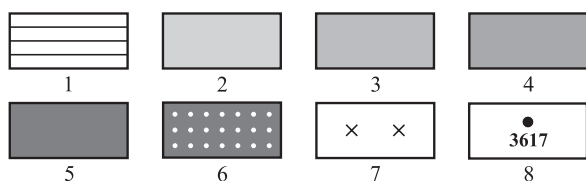
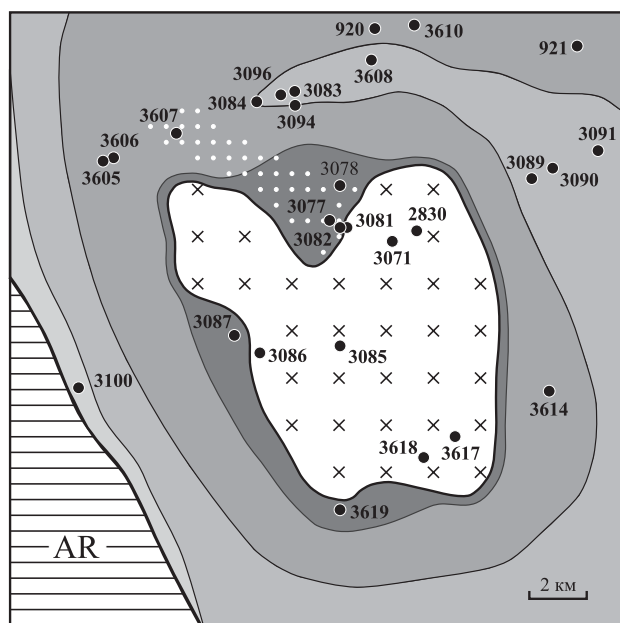


Рис. 1. Положение полимиктовых конгломератов в контактово-термальном ореоле Роговской интрузии:

- 1 – архейские плагиезнысы и плагимигматиты;
- 2–5 – раннепротерозойские породы оскольской серии, метаморфизованные в условиях доломит-кварцевой (2), хлорит-кальцит-кварцевой (3), роговообманковой (4) и диопсидовой (5) ступеней;
- 6 – пачка полимиктовых конгломератов;
- 7 – диориты и гранодиориты Роговской интрузии;
- 8 – скважины и их номера

пород. Размер их колеблется от гравийного до первых сантиметров. Вещественный состав галек значительно разнообразнее и среди них, согласно минералого-петрохимической систематике [19], можно выделить группу пересыщенных кремнеземом алюмосиликатных низкокальциевых пород (метапелитов), группу алюмосиликатных высококальциевых пород (метабазитов) и группу силикатно-карбонатных пород.

Между гальками и цементом наблюдаются концентрические биметасоматические реакционные зоны, состав, мощность и количество которых меняются в зависимости от состава реагирующих сред и условий метаморфизма пород. В слабо метаморфизованных конгломератах установлено наличие только очень маломощных (около 1 мм) единичных реакционных зон и только при определенных соотношениях состава галек и цемента. С увеличением степени метаморфизма пород их количество возрастает, а общая мощность достигает 1,5–2 см. Все реакционные зоны характеризуются значительно более крупным относительно реагирующих сред размером зерен как породообразующих, так и акцессорных минералов, и подобное увеличение размерности кристаллов является характерной чертой метасоматического минералообразования в условиях постепенного привноса–выноса компонентов [2].

Объектом исследования являлись биметасоматические зоны, образовавшиеся при взаимодействии пересыщенных кремнеземом алюмосиликатного высококальциевого цемента и силикатно-карбонатных галек конгломератов, вскрытых в экзоконтакте Роговской диорит-гранодиоритовой интрузии (скв. 3082). Было установлено, что и цемент, и гальки по специфике вещественного состава могут быть более дробно подразделены на глиноземистый и низкоглиноземистый типы, биметасоматическая зональность между которыми рассматривается ниже.

Фазовые равновесия

Взаимодействие низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки. Цемент зеленовато-темно-серого цвета имеет мелкозернистую структуру и сложен гранобластовым агрегатом клинопироксена, плагиоклаза и кварца с обильной вкрапленностью ильменита, магнетита и сфена, в виде единичных зерен в нем присутствуют амфибол, биотит и кальцит. Галька резко уплощенной формы размером 4,7×0,8 см представлена зеленовато-светло-серой силикатно-карбонатной породой с мелкозернистой гранобластовой структурой и тонкослоистой текстурой, обусловленной присутствием среди кальцит-кварцевой основной массы линзовидных обособлений и тонких (0,1–0,2 мм) прослоев, обогащенных алюмосиликатными минералами (гранатом, клинопироксеном, эпидотом, плагиоклазом, скаполитом) (рис. 2).

Между цементом и галькой наблюдается область реакционного взаимодействия, в пределах которой по

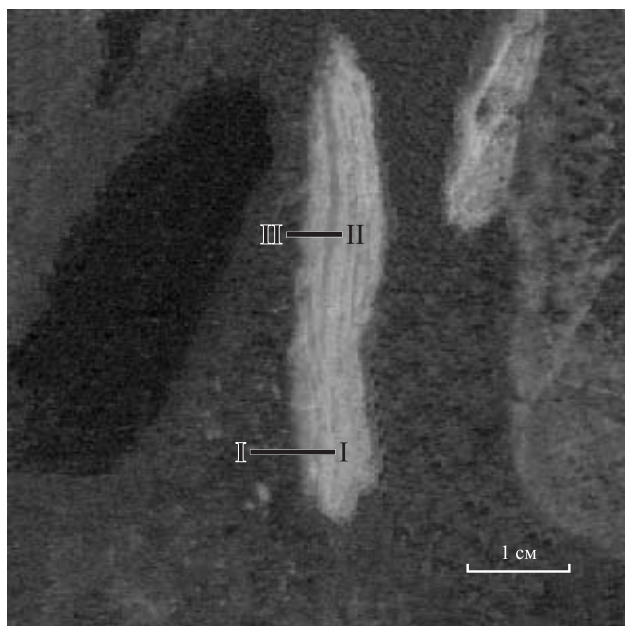


Рис. 2. Галька глиноземистой силикатно-карбонатной породы в низкоглиноземистом алюмосиликатном высококальциевом цементе (полированный штупф, скв. 3082, глуб. 241,7 м):

I-I и II-II – профили микрозондовых анализов минералов

исчезновению или появлению тех или иных минеральных фаз выделяются пять биметасоматических зон (рис. 3). В направлении от цемента к гальке в парагенезисе первыми исчезают амфибол и биотит (зоны 1 и 2), судить о последовательности исчезновения которых

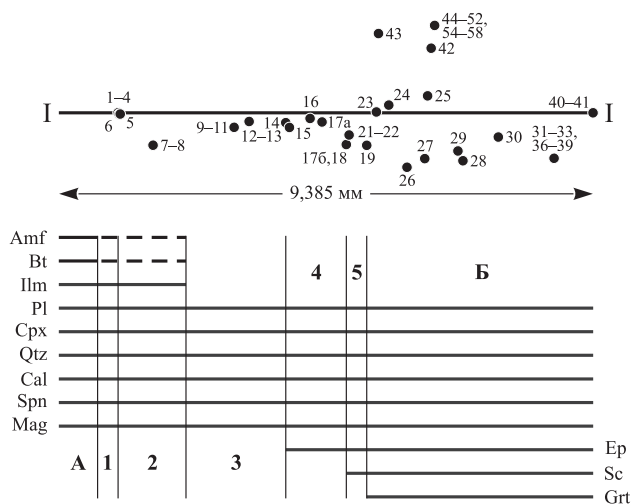


Рис. 3. Изменение минерального фазового состава биметасоматических зон (1–5) при взаимодействии низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента (А) и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки (Б) и положение точек микрозондовых анализов минералов по профилю I–I. *Анализы:*

- Ilm* – 4; *Pl* – 2, 6, 8, 11, 41;
- Cpx* – 1, 3, 7, 10, 12, 15, 18, 24, 27, 32, 36, 40, 46, 49, 55, 57;
- Cal* – 9, 17a, 52, 58; *Spn* – 13, 16;
- Mag* – 5; *Ep* – 14, 22, 33, 39, 43;
- Sc* – 17b, 21, 31, 38, 54;
- Grt* – 19, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 42, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 56

затруднительно, так как они присутствуют в виде единичных зерен. Далее наблюдается резкое увеличение количества мелкой сыпи сфена, полностью замещающего ильменит (зона 3). Парагенезис этой биметасоматической зоны характеризуется минимальным числом минеральных фаз. По мере дальнейшего приближения к гальке возрастает содержание клинопироксена, значительно увеличивается размер кристаллоблобов сфена и появляются сначала эпидот (зона 4), а затем скаполит (зона 5). Между зоной 5 и галькой наблюдается оторочка существенно гранатового состава (рис. 4), на фронте которой присутствуют сростки крупных зерен магнетита. Эта оторочка, вероятно, также входит в область реакционного биметасоматического взаимодействия сред, но характеризуется идентичным с галькой минеральным парагенезисом.

Таким образом, при взаимодействии низкоглиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и глиноземистой силикатно-карбонатной сред в биметасоматических зонах наблюдается следующая смена минеральных парагенезисов: $Amf + Bt + Ilm + Pl + Cpx + Qtz + Cal + Spn + Mag$ (цемент) $\rightarrow \pm Amf + Bt + Ilm + Pl + Cpx + Qtz + Cal + Spn + Mag$ (зоны 1 и 2) $\rightarrow Pl + Cpx + Qtz + Cal + Spn + Mag + Ep$ (зона 3) $\rightarrow Pl + Cpx + Qtz + Cal + Spn + Mag + Ep + Sc$ (зона 4) $\rightarrow Pl + Cpx + Qtz + Cal + Spn + Mag + Ep + Sc + Grt$ (гранатовая оторочка и галька)*.

Наряду с этим в области биметасоматического взаимодействия сред выявлены закономерные изменения состава минералов. По мере убывания количества минеральных фаз от цемента к реакционным зонам 1–3 монотонно возрастает основность плагиоклаза (от $Ab_{64}An_{35}Or_1$ до $Ab_{31}An_{68}Or_1$) (рис. 5, 6), увеличивается доля волластонитового и ферросилитового миналов и снижается содержание энстатитового компонента (от $Wo_{46}En_{40}Fs_{14}$ до $Wo_{49-50}En_{23-29}Fs_{21-27}$) (см. рис. 6) в ферросалит-салитовом клинопироксене (рис. 7). От биметасоматической зоны 3 к гальке с увеличением в парагенезисах количества минеральных фаз наблюдается выравнивание основности плагиоклаза (до $Ab_{15}An_{85}$) и доли волластонитового минала при снижении ферросалитового и увеличении энстатитового компонентов в клинопироксене (до $Wo_{49-50}En_{29-33}Fs_{17-21}$), возрастает содержание мейонитового минала в скаполите (от $Me_{69}Ma_{31}$ до $Me_{78}Ma_{22}$) и железистость эпидота (см. рис. 6). В гранатовой оторочке по направлению к гальке резко снижается доля андрадитового и увеличивается количество гроссулярового компонентов (см. рис. 6) в гранате (от $Adr_{75}Grs_{24}Alm_1$ до $Adr_{44}Grs_{56}$) (рис. 8).

Наблюдаемые закономерности изменения фазовых равновесий, химического состава минеральных

* Здесь и далее условные сокращения минералов: Ab – альбит, Adr – андрадит, Alm – альмандин, An – анортит, Ann – аннит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Cpx – клинопироксен, Czo – клиноцозит, East – истонит, En – энстатит, Ep – эпидот, Fs – ферросилит, Grs – гроссуляр, Grt – гранат, Ilm – ильменит, Ma – мариолит, Mag – магнетит, Me – мейонит, Ort – ортоклаз, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Sc – скаполит, Sdf – сидерофиллит, Spn – сфен, Wo – волластонит.

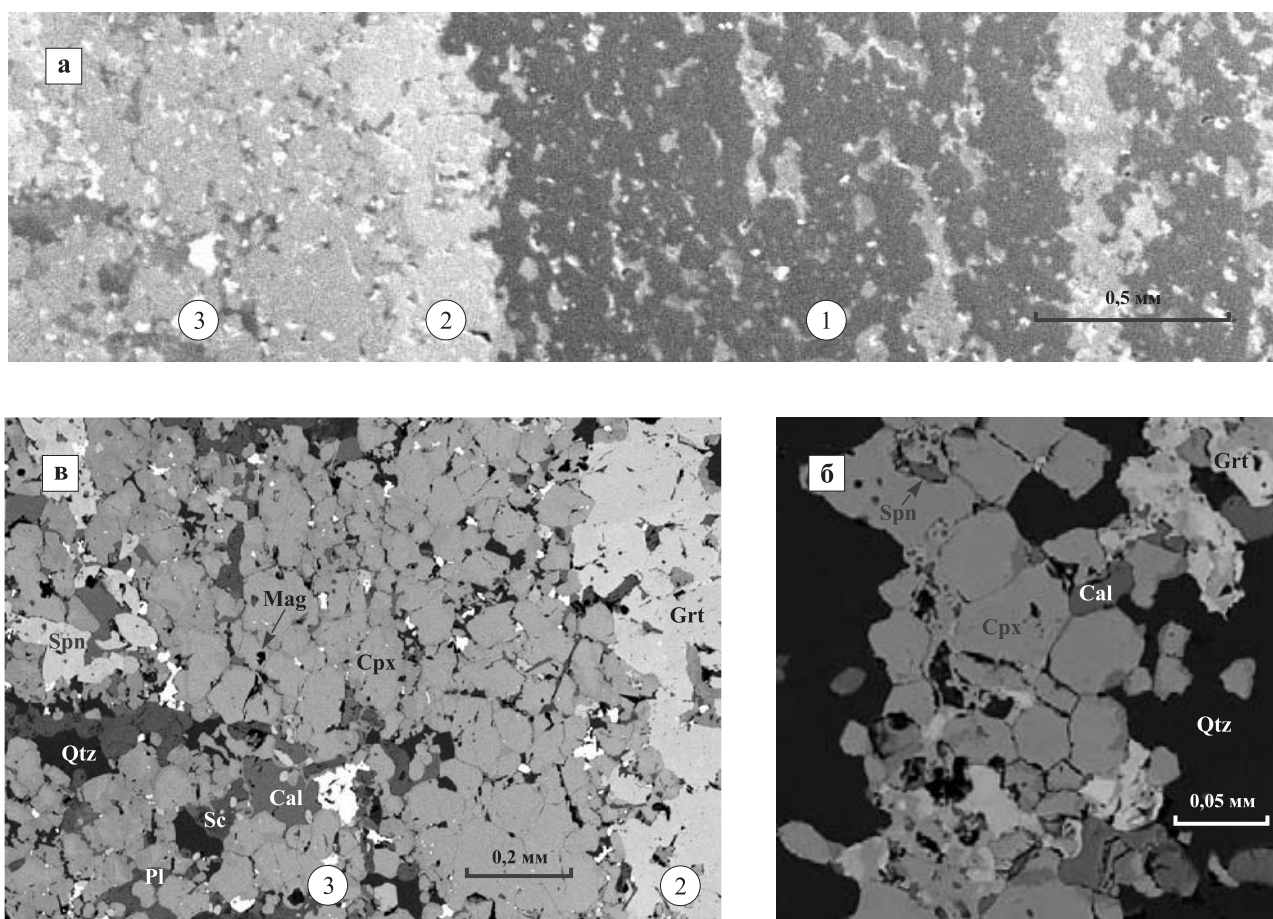


Рис. 4. Детали строения биметасоматических зон при взаимодействии низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальцевого цемента и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки (профиль II-II, фото в отраженных электронах):

- а* – существенно гранатовая оторочка (2) на контакте гальки (1) и биметасоматических зон (3);
б – обогащенный алюмосиликатными минералами прослой в кальцит-кварцевой основной массе гальки;
в – контакт гранатовой оторочки (2) и биметасоматических зон (3)

фаз и их количественного соотношения позволяют с уверенностью говорить о том, что при взаимодействии низкоглиноземистой алюмосиликатной высококальцевой и глиноземистой силикатно-карбонатной сред в направлении от цемента к гальке осуществлялся массоперенос натрия, калия, титана, магния и двухвалентного железа, а от гальки к цементу – кремнезема, кальция, глинозема и, вероятно, трехвалентного железа.

Взаимодействие глиноземистого алюмосиликатного высококальцевого цемента и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной гальки. Цемент зеленовато-темно-серого цвета характеризуется мелкозернистой структурой и сложен лепидонематогранобластовым агрегатом плагиоклаза, амфибола, кварца и биотита с мелкой вкрапленностью ильменита, магнетита и сфена. Галька эллипсоидальной формы размером 2×1,4 см представлена светло-серой мелкозернистой массивной кальцит-кварцевой породой с небольшим количеством амфибола и эпидота и редкими мелкими зернами магнетита и сфена (рис. 9).

Область реакционного взаимодействия между цементом и галькой хорошо видна макроскопически в виде довольно широкой темно-зеленой оболочки су-

щественно эпидот-амфиболового состава, в пределах которой по исчезновению или появлению минеральных фаз выделяются четыре биметасоматические зоны (рис.10). Первая в направлении от цемента к гальке зона характеризуется исчезновением ильменита, что сопровождается образованием обильной сыпи мелких зерен сфена. Далее наблюдается появление в парагенезисе эпидота (зона 2) с последующим исчезновением сначала биотита (зона 3), а затем и плагиоклаза с формированием широкой (около 3,5 мм) зоны 4 с минимальным количеством минеральных фаз. В пределах четвертой зоны значительно возрастает содержание эпидота и амфибола и увеличивается размер кристаллобласт сфена и магнетита. Переход к гальке четко фиксируется появлением кальцита и резким уменьшением содержания амфибола и эпидота.

Таким образом, при взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальцевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред смена минеральных парагенезисов в биметасоматических зонах имеет следующий вид: $Plm + Bt + Pl + Amf + Qtz + Spn + Mag$ (цемент) $\rightarrow Bt + Pl + Amf + Qtz + Spn + Mag$ (зона 1) $\rightarrow Bt + Pl + Amf + Qtz + Spn + Mag + Ep$ (зона 2) $\rightarrow Pl +$

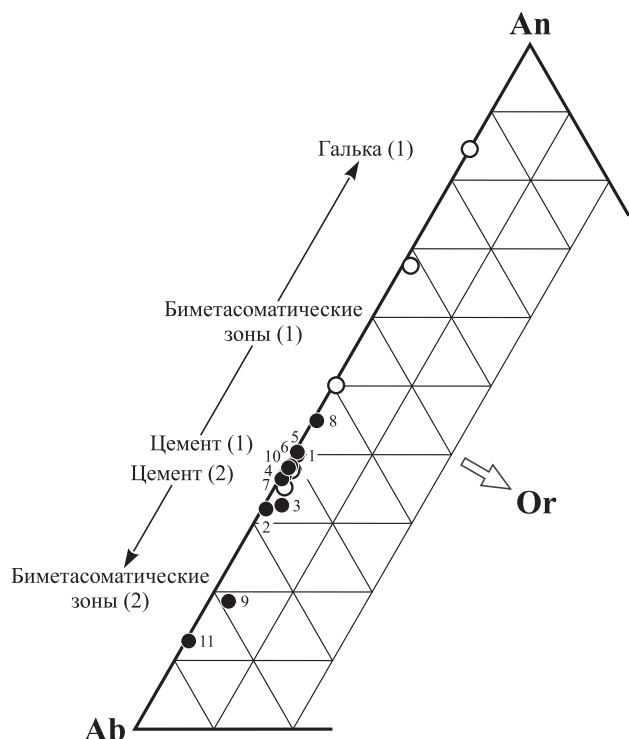


Рис. 5. Изменение состава плагиоклаза при биметасоматическом взаимодействии низкоглиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и глиноземистой силикатно-карбонатной (1) и глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной (2) сред. Номера точек состава на рисунке соответствуют номерам анализов, приведенных в табл. 3

$Amf + Qtz + Spn + Mag + Ep$ (зона 3) $\rightarrow Amf + Qtz + Spn + Mag + Ep$ (зона 4) $\rightarrow Amf + Qtz + Spn + Mag + Ep + Cal$ (галька).

Изменение самих минеральных фаз в биметасоматических зонах наиболее четко проявлено в составе плагиоклаза и амфибола. В отличие от биметасоматического взаимодействия низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки в рассматриваемом случае по мере приближения к гальке наблюдается не увеличение основности плагиоклаза, а наоборот его раскисление от $Ab_{54-67}An_{32-45}Or_0-2$ до $Ab_{87}An_{13}Or_0$ (см. рис. 5). Состав амфиболов во взаимодействующих средах и биметасоматических зонах широко варьирует от магнезиальной роговой обманки до актинолита и характеризуется увеличением магнезиальности (от 0,56 – 0,65 до 0,77) по мере снижения их глиноземистости (рис. 11).

Исходя из выявленных закономерностей изменения фазовых равновесий, химического состава и количественного соотношения минеральных фаз, в рассматриваемом случае взаимодействия глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред можно говорить о массопереносе из цемента в гальку калия, натрия, глинозема, титана, магния и двухвалентного железа, а из гальки в цемент – кремнезема, кальция и, возможно, трехвалентного железа.

Таким образом, результаты изучения фазовых равновесий при взаимодействии рассмотренных типов алюмосиликатных высококальциевых и силикатно-карбонатных пород свидетельствуют о том, что состав минеральных парагенезисов в реакционных зонах и направленность диффузии компонентов определяются спецификой химического состава реагирующих сред. Направленность массопереноса при этом влияет на закономерности изменения состава минералов. Так, например, при встречной диффузии кальция и глинозема относительно натрия происходит постепенное увеличение от цемента к гальке основности плагиоклаза, а при встречной диффузии только кальция относительно натрия и глинозема в том же направлении, наоборот, наблюдается его раскисление. В свою очередь, выявленные закономерности постепенного изменения состава большинства минералов в различных зонах реакционного взаимодействия сред подтверждают диффузионную природу рассматриваемой метасоматической зональности, так как, в отличие от инфильтрационного метасоматоза, при котором на каждом контакте зон должен наблюдаться скачок химических потенциалов компонентов, при формировании диффузионных колонок происходит непрерывное изменение их химических потенциалов [2].

В пределах областей взаимодействия между цементом и гальками в направлении от реагирующих сред наблюдается последовательное исчезновение из парагенезисов отдельных минералов и образование реакционной зоны с минимальным количеством фаз, которая фиксирует положение исходного контакта реагирующих сред, где максимальное число компонентов должно переходить во вполне подвижное состояние [20]. Следует обратить особое внимание на положение этой зоны в области диффузионного взаимодействия, так как оно определяет симметричность строения возникающих биметасоматических колонок. Примером их симметричного строения служит рассмотренный выше случай взаимодействия низкоглиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и глиноземистой силикатно-карбонатной сред, когда от зоны с минимальным количеством минеральных фаз как в сторону цемента, так и в сторону гальки наблюдается одинаковое количество биметасоматических зон. Асимметричное строение области диффузионного обмена иллюстрируется взаимодействием глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред, при котором зона с минимальным количеством фаз непосредственно примыкает к гальке, а три биметасоматические зоны наблюдаются только в направлении к цементу. Так как образование реакционных зон связано с последовательным переходом компонентов из вполне подвижного состояния в инертное, то очевидно, что степень симметрии области биметасоматического взаимодействия должна зависеть от соотношения количества компонентов, диффундирующих навстречу друг другу. Так, в рассмотренном случае симметричного строения биметасоматической

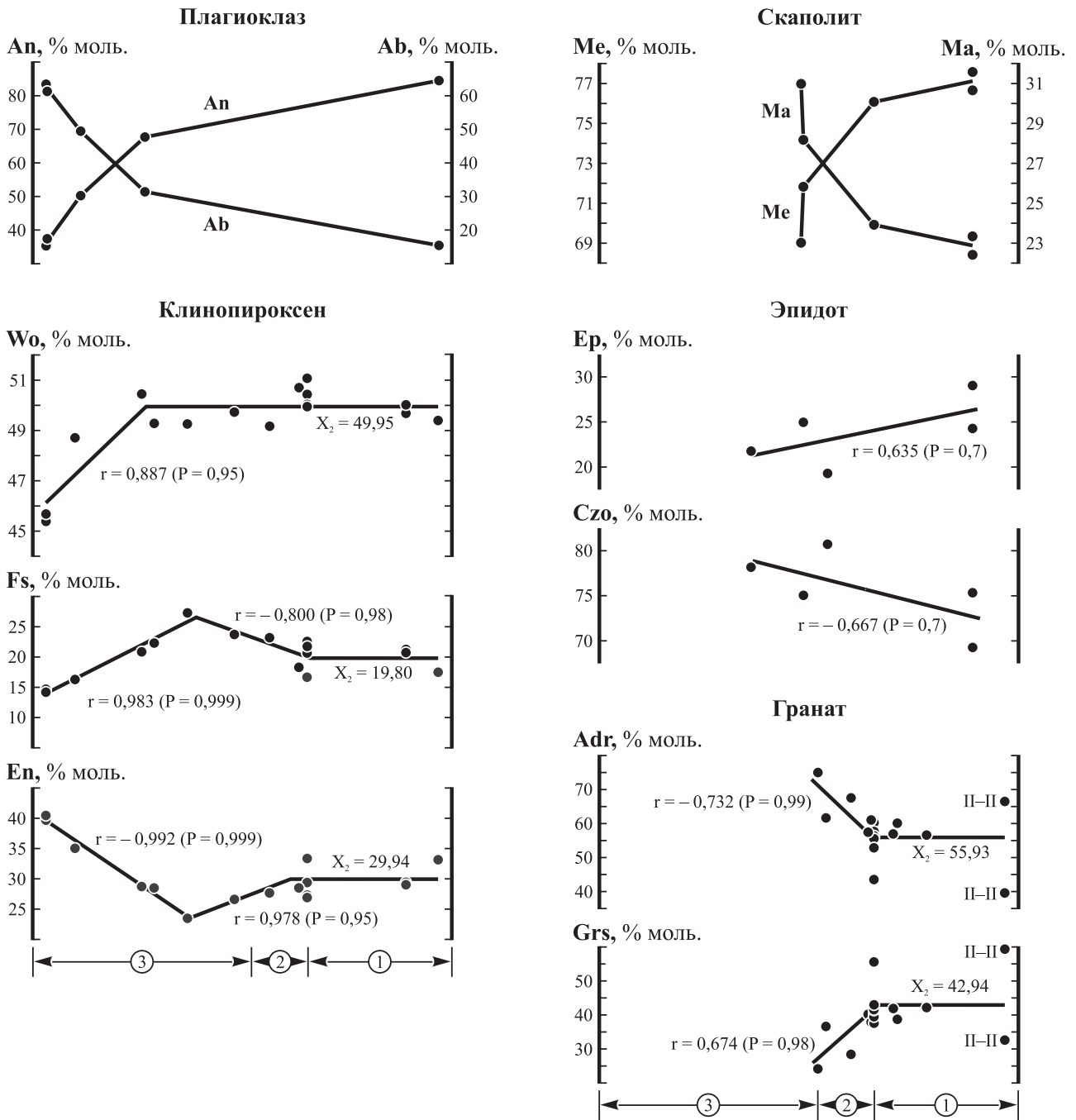


Рис. 6. Изменение компонентного состава минералов при биметасоматическом взаимодействии низкоглиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и глиноземистой силикатно-карбонатной сред (профиль I-I):

1 – галька, 2 – гранатовая оторочка, 3 – биметасоматические зоны,
 II-II – состав гранатов из центральной части гальки по профилю II-II, r – коэффициент корреляции,
 P – вероятность значимости корреляции, X_2 – среднее содержание в гальке

колонки было установлено, что количество компонентов, диффундировавших от цемента к гальке (TiO_2 , FeO , MgO , Na_2O , K_2O) и от гальки к цементу (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO), учитывая изоморфизм железа и магния в феррических минералах, одинаковое. Значительное преобладание компонентов, массоперенос которых осуществлялся из цемента в гальку (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , Na_2O , K_2O) над встречно диффундирующими (SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO), привело к формированию резко асимметричной биметасоматической колонки.

Термобарические параметры

Оценка РТ-параметров протекания рассматриваемых процессов биметасоматического взаимодействия алюмосиликатных высококальциевых и силикатно-карбонатных сред проводилась с помощью гранат-клинопироксеновых [21–23], клинопироксен-ильменитового [24], магнетит-ильменитового [25], биотит-магнетит-кварцевого [26] и роговообманково-плаггиоклазового

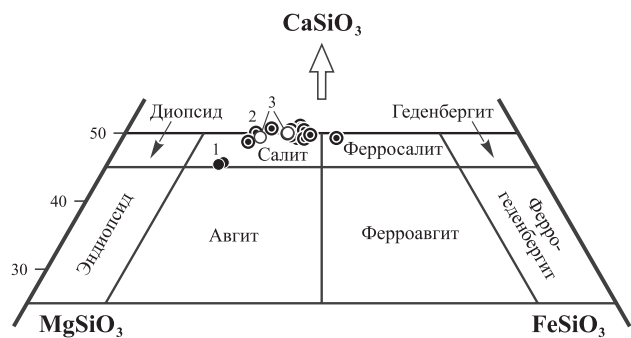


Рис. 7. Вариации состава клинопироксена при биметасоматическом взаимодействии низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки:

1 – цемент, 2 – биметасоматические зоны, 3 – галька

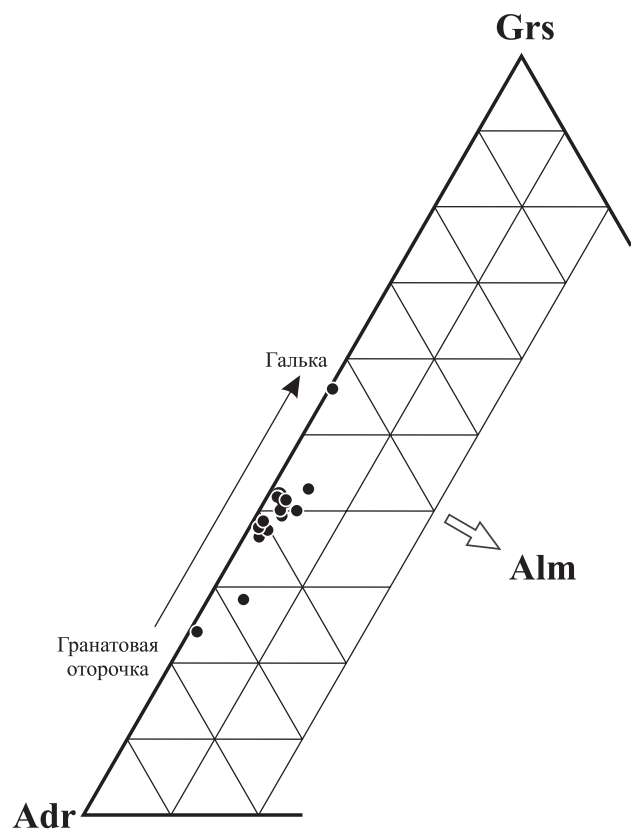


Рис. 8. Вариации состава граната при биметасоматическом взаимодействии низкоглиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента и глиноземистой силикатно-карбонатной гальки

[27] геотермометров и гранат-клинопироксен-плаггиоклаз-кварцевого [28] геобарометра.

При биметасоматических процессах, когда даже в пределах одной диффузионной зоны наблюдается изменение состава минералов, обусловленное непрерывным изменением химических потенциалов компонентов, еще острее встает вопрос о равновесности сосуществующих фаз. В связи с этим для определения температуры и давления использовались результаты микрозондовых анализов только минеральных фаз, находящихся в пределах одной биметасоматической зоны и непосредственно контактирующих друг с другом. Несмотря

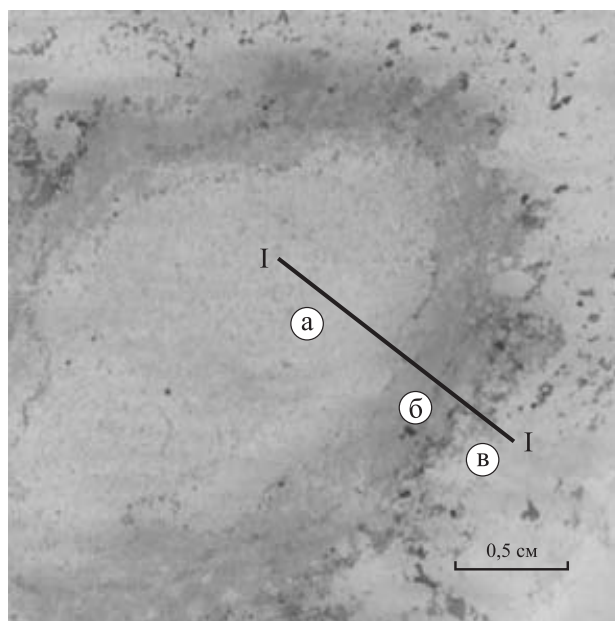


Рис. 9. Галька низкоглиноземистой силикатно-карбонатной породы в глиноземистом алюмосиликатном высококальциевом цементе (прозрачно-полированный шлиф в проходящем свете, скв. 3082, глуб. 161,6 м):

а – галька, б – биметасоматические зоны, в – цемент, I-I – профиль микрозондовых анализов минералов

на это, разница температур, полученных даже по одному и тому же геотермометру, достигает 244–295 °С. Однако средние значения температурных оценок варьируют несущественно и составляют 454–538 °С (табл. 1). При данных температурах рассчитанные значения давления колеблются от 1,5 до 2,4 кбар, составляя в среднем 1,8–2,1 кбар (табл. 2).

Таким образом, рассматриваемые биметасоматические процессы протекали в низкобарических условиях (около 2 кбар) при температурах 450–540 °С, которые соответствуют амфибол-роговиковой фации контактового метаморфизма. Эти результаты согласуются с полученными ранее данными об условиях метаморфизма карбонатных пород в эндоконтактовой зоне Роговской интрузии [29].

Кинетика диффузии щелочей

Оценка кинетических параметров диффузии петрогенных компонентов может быть основана на известной зависимости

$$D_a^x = \frac{L_a^2}{t}, \quad (1)$$

где D_a^x – коэффициент диффузии компонента a в среде x ; L_a – расстояние, на которое осуществляется диффузия компонента a ; t – время, необходимое для диффузии.

Расчет собственно коэффициентов диффузии компонентов затруднен из-за отсутствия данных о длительности протекания процесса диффузии. Однако

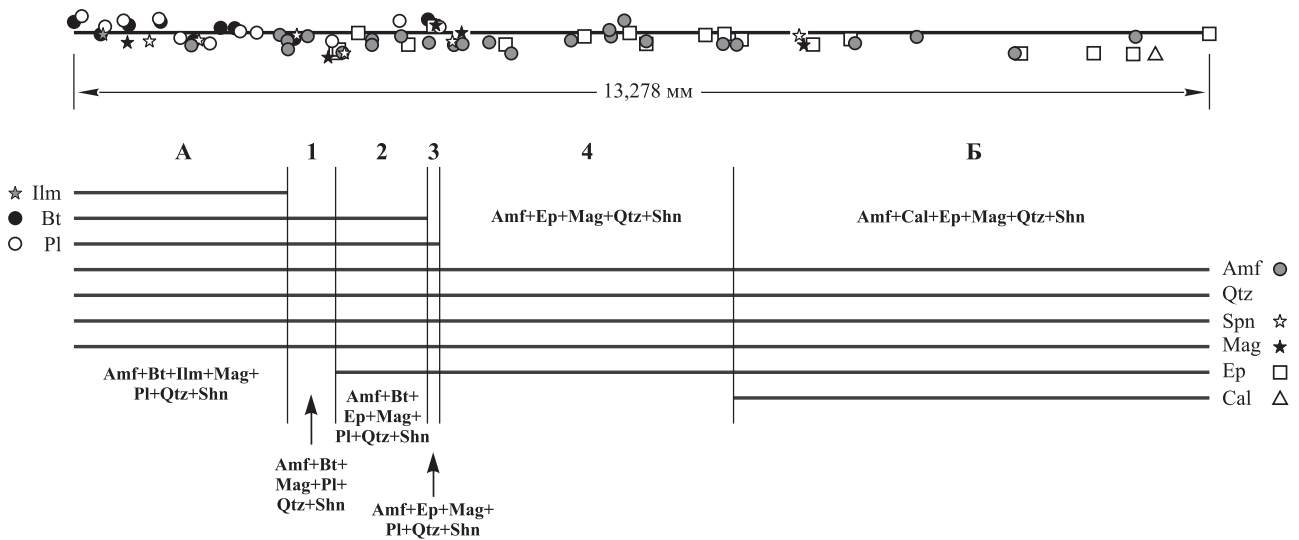


Рис. 10. Изменение минерального фазового состава биметасоматических зон (1–4) при взаимодействии глиноземистого алюмосиликатного высококальциевого цемента (А) и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной гальки (Б) и положение точек микрондовых анализов минералов по профилю I–I

в этом случае возможно рассчитать отношение коэффициентов диффузии компонентов (например, а и b) по соотношению расстояний их миграции, так как фактор времени для одного и того же образца устраняется его сокращением:

$$\frac{D_a^x}{D_b^x} = \frac{L_a^2 \cdot t}{L_b^2 \cdot t} = \frac{L_a^2}{L_b^2} \quad (2)$$

Отсюда вытекает, что соотношение коэффициентов диффузии компонентов соответствует отношению квадратов расстояний, на которые осуществлялся их массоперенос. Эти расстояния могут быть определены по ширине зон изменения концентрации компонентов между реагирующими средами или по ширине зон, в пределах которых наблюдается изменение содержания рассматриваемых компонентов в различных минераль-

ных фазах. Однако в последнем случае должно соблюдаться условие постоянства количественно-минерального состава этих зон.

Имеющиеся в настоящее время данные позволяют провести оценку кинетических параметров диффузии только щелочей и только при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред. Эта оценка осуществлялась по ширине зон изменения концентраций Na₂O в плагиоклазе и амфиболе и K₂O в амфиболе и биотите. Для этого с помощью корреляционного анализа выявлялись области градиентного состава минеральных фаз, характеризующиеся наиболее высоким уровнем значимости коэффициентов корреляции. Границы диффузии натрия и калия определялись по пересечению рассчитанных линий регрессии концентрации этих компонентов в минеральных фазах в пределах градиентных зон с линиями их устойчивого содержания в сопряженных зонах или реагирующих средах.

Начало диффузионного перемещения щелочей фиксируется вблизи границы цемента с биметасоматической зоной 1 по возрастанию концентраций Na₂O в плагиоклазе (табл. 3) и K₂O в биотите (табл. 4), а завершение их массопереноса – в пределах биметасоматической зоны 4 по снижению концентраций этих компонентов в амфиболе (табл. 5). Средние концентрации K₂O и Na₂O в одних и тех же минералах цемента и гальки, включая примыкающие к ним биметасоматические зоны, превышают аналитическую погрешность, так как между ними выявлены статистически значимые (P = 0,98–99) различия (табл. 6). Исходя из этого, рассчитанная ширина диффузионного перемещения K₂O составляет 4,895 мм, а Na₂O – 4,231 мм (рис. 12). Согласно формуле (2) соотношение скоростей диффузии этих компонентов DK₂O/DNa₂O = 4,8952/4,2312 ≈ 1,3, что указывает на более высокую скорость массопереноса калия относительно натрия при биметасоматичес-



Рис. 11. Вариации состава амфибола при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред. Номера точек состава на рисунке соответствуют номерам анализов, приведенных в табл. 5

**Температурные оценки биметасоматического взаимодействия
алюмосиликатных высококальциевых и силикатно-карбонатных сред**

№ образца	№ профиля	Парагенезис	№ анализа	Геотермометр	T, °C			
3082/241,7	1	Cal + Cpx + Ep + Grt + Mag + Pl + Qtz + Sc + Spn	Grт (23) – Cpx (24)	Grt–Cpx [21]	418			
			Grт (47) – Cpx (46)		438			
			Grт (48) – Cpx (46)		496			
			Grт (50) – Cpx (49)		634			
			Grт (26) – Cpx (27)		488			
	2		Grт (19) – Cpx (18)		390			
			Grт (17) – Cpx (18)		581			
			Grт (17) – Cpx (16)		557			
			Grт (20) – Cpx (18)		400			
	Среднее					489		
	1		Grт (23) – Cpx (24)	Grt – Cpx [22]	413			
			Grт (47) – Cpx (46)		444			
			Grт (48) – Cpx (46)		508			
			Grт (50) – Cpx (49)		676			
			Grт (26) – Cpx (27)		487			
	2		Grт (19) – Cpx (18)		383			
			Grт (17) – Cpx (18)		605			
			Grт (17) – Cpx (16)		576			
			Grт (20) – Cpx (18)		385			
	Среднее					497		
	1		Grт (23) – Cpx (24)	Grt – Cpx [23]	399			
			Grт (47) – Cpx (46)		429			
			Grт (48) – Cpx (46)		493			
			Grт (50) – Cpx (49)		663			
			Grт (26) – Cpx (27)		471			
	2		Grт (19) – Cpx (18)		368			
			Grт (17) – Cpx (18)		591			
			Grт (17) – Cpx (16)		561			
Grт (20) – Cpx (18)		368						
Среднее					483			
1	Cal + Cpx + Mag + Ilm + Pl + Qtz + Spn	Cpx (1) – Ilm (4)	Cpx – Ilm [24]	465				
		Mag (5) – Ilm (4)	Mag – Ilm [25]	513				
		Mag (2) – Ilm (1)		394				
		Среднее					454	
3082/161,6	1	Amf + Bt + Mag + Ilm + Pl + Qtz + Spn	Bt (3) – Mag (2)	Bt – Mag – Qtz [26]	538			
			Bt (30) – Mag (5)	538				
			Bt (30) – Mag (6)	539				
			Среднее					538
			Hbl (16) – Pl (5)	Hbl – Pl [27]	492			
			Hbl (16) – Pl (6)	488				
			Среднее					490

ком взаимодействия глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред.

Получив таким образом соотношения скоростей диффузии компонентов как минимум для двух температурных условий, можно будет рассчитать их изменение во всем возможном диапазоне значений температур, ожидаемых в пределах земной коры, по известной зависимости

$$D = D_0 \cdot \exp(-E/R \cdot T), \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии; D₀ – предэкспонент-

ный коэффициент; E – энергия, затрачиваемая на диффузию; R – универсальная газовая постоянная; T – температура по Кельвину, так как величина D₀·exp(-E/R) постоянна для каждого компонента.

Располагая данными о кинетических параметрах диффузии при биметасоматическом взаимодействии разнообразных по химическому составу сред в различных термобарических условиях, станет возможна расшифровка закономерностей изменения форм массопереноса петрогенных элементов в зависимости от температуры, давления и состава реагирующих сред.

Таблица 2

**Оценки давления при биметасоматическом взаимодействии
алюмосиликатных высококальциевых и силикатно-карбонатных сред**

№ образца	№ профиля	Парагенезис	№ анализа	Геобарометр	Давление, кбар	
					450 °С	540 °С
3082/241,7	2	Cal + Cpx + Ep + Grt + Mag + Pl + Qtz + Sc + Spn	Grt (17) – Cpx (16) – Pl (15)	Grt–Cpx–Pl–Qtz [28]	1,8	1,5
			Grt (17) – Cpx (18) – Pl (15)		2,1	1,8
			Grt (21) – Cpx (16) – Pl (15)		2,1	1,8
			Grt (21) – Cpx (18) – Pl (15)		2,4	2,1
			Среднее		2,1	1,8

Таблица 3

**Изменение состава плагиоклаза при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой
алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред**

№ образца	3082/161,6										
	Позиция	цемент								биметасоматические зоны	
№ анализа		Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-4	Pl-5	Pl-6	Pl-7	Pl-8	Pl-9	Pl-10
SiO ₂	59,23	63,13	60,56	61,32	59,41	59,63	61,29	57,41	64,00	57,07	65,61
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	27,03	25,21	24,94	25,44	25,94	26,08	26,00	27,38	23,31	25,81	22,10
FeO	0,04	0,03	0,46	0,11	0,03	0,02	0,14	0,05	0,12	0,04	0,22
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	7,79	6,16	6,13	7,18	7,92	7,45	7,11	8,86	3,56	7,48	2,49
Na ₂ O	6,40	7,13	6,74	6,72	6,40	6,54	6,79	5,92	8,29	6,66	9,27
K ₂ O	0,09	0,08	0,35	0,07	0,05	0,09	0,05	0,08	0,40	0,06	0,06
Сумма	100,58	101,74	99,18	100,84	99,75	99,81	101,38	99,70	99,68	97,12	99,75
Количество катионов в пересчете на 8 анионов O ²⁻											
Si	2,64	2,78	2,74	2,73	2,68	2,68	2,71	2,59	2,86	2,63	2,92
Al ^{IV}	1,42	1,31	1,33	1,34	1,38	1,38	1,36	1,46	1,23	1,40	1,16
ΣR ^{IV}	4,06	4,09	4,07	4,07	4,06	4,06	4,07	4,05	4,09	4,03	4,08
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,37	0,29	0,30	0,34	0,38	0,36	0,34	0,43	0,17	0,37	0,12
Na	0,55	0,61	0,59	0,58	0,56	0,57	0,58	0,52	0,72	0,59	0,80
K	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
ΣR ^{VI}	0,93	0,90	0,93	0,92	0,94	0,93	0,93	0,95	0,91	0,96	0,93
Мольные доли, %											
SiO ₂	65,96	68,94	68,07	67,64	66,42	66,70	67,38	64,60	71,16	65,73	72,49
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	17,74	16,22	16,52	16,54	17,09	17,19	16,84	18,16	15,27	17,52	14,39
FeO	0,04	0,03	0,43	0,10	0,03	0,02	0,13	0,05	0,11	0,04	0,20
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	9,29	7,21	7,38	8,49	9,49	8,93	8,38	10,68	4,24	9,23	2,95
Na ₂ O	6,91	7,55	7,34	7,19	6,94	7,09	7,24	6,46	8,94	7,44	9,93
K ₂ O	0,06	0,06	0,25	0,05	0,04	0,06	0,04	0,06	0,28	0,04	0,04
Компонентный состав, % моль.											
Ab	59,45	67,34	65,06	62,60	59,20	61,02	63,14	54,46	78,79	61,47	86,75
An	40,00	32,16	32,71	36,97	40,50	38,43	36,55	45,06	18,70	38,16	12,88
Or	0,55	0,50	2,23	0,43	0,30	0,55	0,31	0,48	2,51	0,37	0,37

**Изменение состава биотита при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой
алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред**

№ образца	3082/161,6							
Позиция	цемент						биметасоматические зоны	
							1	2
№ анализа	Bt-1	Bt-2	Bt-5	Bt-7	Bt-9	Bt-10	Bt-13	Bt-30
SiO ₂	35,14	36,48	37,28	37,77	36,09	35,57	36,28	35,40
TiO ₂	2,15	2,62	2,16	2,53	3,39	2,61	2,01	2,04
Al ₂ O ₃	16,63	15,98	16,40	16,57	16,53	16,17	16,61	16,20
FeO	16,42	16,52	17,00	15,58	17,28	16,06	15,35	16,54
MnO	0,24	0,21	0,24	0,26	0,21	0,16	0,26	0,30
MgO	13,77	13,52	14,18	13,31	13,02	12,71	14,14	14,34
CaO	0,09	0,10	0,06	0,10	0,06	0,09	0,06	0,08
Na ₂ O	0,06	0,07	0,06	0,08	0,04	0,08	0,05	0,08
K ₂ O	8,97	8,45	8,91	9,23	9,37	9,34	9,47	9,34
F	0,29	0,17	0,10	0,19	0,47	0,30	0,37	0,50
Cl	0,04	0,05	0,07	0,06	0,03	0,07	0,07	0,06
Сумма	93,80	94,17	96,46	95,68	96,49	93,16	94,67	94,88
Количество катионов в пересчете на 11 анионов O ²⁻								
Si	2,74	2,85	2,83	2,90	2,77	2,81	2,80	2,73
Al ^{IV}	1,26	1,15	1,17	1,10	1,23	1,19	1,20	1,27
ΣR^{IV}	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	0,28	0,32	0,30	0,40	0,27	0,32	0,31	0,21
Ti	0,13	0,15	0,12	0,15	0,20	0,16	0,12	0,12
Fe ²⁺	1,07	1,08	1,08	1,00	1,11	1,06	0,99	1,07
Mn	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Mg	1,60	1,57	1,60	1,52	1,49	1,50	1,62	1,65
ΣR^{VI}	3,10	3,13	3,12	3,09	3,08	3,05	3,06	3,07
Ca	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Na	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
K	0,89	0,84	0,86	0,90	0,92	0,94	0,93	0,92
ΣR^{VIII}	0,91	0,86	0,87	0,92	0,93	0,96	0,94	0,94
Мольные доли, %								
SiO ₂	40,44	41,65	41,45	42,63	40,78	41,50	41,29	40,20
TiO ₂	1,86	2,25	1,81	2,15	2,88	2,29	1,72	1,74
Al ₂ O ₃	11,28	10,75	10,75	11,02	11,01	11,12	11,14	10,84
FeO	15,80	15,77	15,81	14,71	16,33	15,67	14,61	15,71
MnO	0,23	0,20	0,23	0,25	0,20	0,16	0,25	0,29
MgO	23,62	23,01	23,51	22,39	21,93	22,11	23,99	24,27
CaO	0,11	0,12	0,07	0,12	0,07	0,11	0,07	0,10
Na ₂ O	0,07	0,08	0,06	0,09	0,04	0,09	0,06	0,09
K ₂ O	6,58	6,15	6,32	6,64	6,75	6,95	6,87	6,77
Компонентный состав, % моль.								
Sdf	14,53	17,87	16,61	21,13	15,29	17,56	15,64	11,19
East	21,42	25,76	24,37	31,67	20,30	24,55	25,27	17,00
Ann	25,88	23,09	23,92	18,89	27,67	24,14	22,59	28,51
Phl	38,16	33,29	35,09	28,32	36,75	33,75	36,50	43,30
Fe/(Fe+Mg)	0,40	0,41	0,41	0,40	0,43	0,42	0,38	0,40

Таблица 5

Изменение состава амфибола при биитасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред

№ образца	3082/161,6												
	цемент						биитасоматические зоны						
	1		2		3		4		3		4		4
Позиция	НЫ-6	НЫ-11	НЫ-12	АсТ-15	НЫ-17	НЫ-19	НЫ-23	АсТ-24	НЫ-26	НЫ-29	НЫ-32	НЫ-33	НЫ-34
№ анализа	46,69	47,74	47,11	50,72	51,02	48,07	45,82	53,21	43,13	44,85	43,01	50,99	46,12
SiO ₂	0,44	0,69	0,97	0,11	0,21	0,18	0,84	0,06	0,70	0,71	1,05	0,36	1,03
TiO ₂	8,28	8,37	7,62	2,36	3,70	4,18	8,15	1,52	8,24	8,92	8,91	4,43	7,76
Al ₂ O ₃	15,05	14,41	14,70	9,70	11,81	11,50	16,08	10,38	15,56	16,04	15,71	12,60	15,58
FeO	0,31	0,35	0,34	0,40	0,42	0,34	0,32	0,31	0,32	0,40	0,28	0,36	0,33
MnO	12,72	13,00	13,00	15,85	16,32	16,44	12,66	17,68	12,87	12,10	11,90	15,73	12,57
MgO	12,40	12,69	12,45	12,26	12,82	12,89	12,31	12,85	12,53	12,80	12,61	12,56	12,35
CaO	0,78	0,77	0,83	0,27	0,39	0,35	0,85	0,16	0,80	0,82	0,87	0,37	0,90
Na ₂ O	0,43	0,44	0,70	0,11	0,25	0,16	0,79	0,04	0,69	0,68	0,92	0,27	0,78
K ₂ O	97,10	98,46	97,72	91,78	96,94	94,11	97,82	96,21	94,84	97,32	95,26	97,67	97,42
Сумма	6,93	6,96	6,95	7,71	7,44	7,32	6,81	7,76	6,67	6,74	6,64	7,38	6,87
Si	1,07	1,04	1,05	0,29	0,56	0,68	1,19	0,24	1,33	1,26	1,36	0,62	1,13
Al ^{IV}	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
ΣR ^{IV}	0,38	0,40	0,28	0,13	0,08	0,08	0,24	0,03	0,17	0,32	0,26	0,13	0,24
Al ^{VI}	0,05	0,08	0,11	0,01	0,02	0,02	0,09	0,01	0,08	0,08	0,12	0,04	0,12
Ti	0,28	0,19	0,20	0,03	0,22	0,00	0,35	0,00	0,43	0,27	0,26	0,28	0,25
Fe ³⁺	1,57	1,57	1,61	1,20	1,21	1,46	1,64	1,27	1,58	1,74	1,76	1,25	1,69
Fe ²⁺	0,04	0,04	0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04
Mn	2,81	2,82	2,86	3,59	3,55	3,73	2,80	3,84	2,96	2,71	2,73	3,39	2,79
Mg	5,13	5,10	5,10	5,02	5,13	5,33	5,16	5,19	5,26	5,18	5,17	5,13	5,13
ΣR ^{VI}	1,97	1,98	1,97	2,00	2,00	2,10	1,96	2,01	2,07	2,06	2,08	1,95	1,97
Ca	0,23	0,22	0,23	0,08	0,11	0,10	0,24	0,05	0,24	0,24	0,26	0,11	0,26
Na	0,08	0,08	0,13	0,02	0,05	0,03	0,15	0,01	0,14	0,13	0,18	0,05	0,15
K	2,28	2,28	2,33	2,10	2,16	2,23	2,35	2,07	2,45	2,43	2,52	2,11	2,38
ΣR ^{VIII}	47,63	47,96	47,64	51,89	49,92	48,39	46,58	51,46	45,10	46,06	45,22	49,92	47,00
SiO ₂	0,34	0,52	0,74	0,08	0,15	0,14	0,64	0,04	0,55	0,55	0,83	0,27	0,79
TiO ₂	4,98	4,96	4,54	1,42	2,13	2,48	4,88	0,87	5,08	5,40	5,52	2,56	4,66
Al ₂ O ₃	12,84	12,11	12,43	8,30	9,66	9,69	13,67	8,40	13,61	13,78	13,81	10,32	13,28
FeO	0,27	0,30	0,29	0,35	0,35	0,29	0,28	0,25	0,28	0,35	0,25	0,30	0,28
MnO	19,34	19,47	19,60	24,17	23,81	24,67	19,19	25,49	20,06	18,52	18,65	22,96	19,10
MgO	13,55	13,66	13,49	13,44	13,44	13,90	13,41	13,32	14,04	14,08	14,21	13,17	13,49
CaO	0,77	0,75	0,81	0,27	0,37	0,34	0,84	0,15	0,81	0,82	0,89	0,35	0,89
Na ₂ O	0,28	0,28	0,45	0,07	0,16	0,10	0,51	0,02	0,46	0,45	0,62	0,17	0,51
K ₂ O	0,64	0,64	0,64	0,75	0,74	0,72	0,63	0,75	0,65	0,61	0,61	0,73	0,62
Mg/(Mg+Fe ²⁺)													

Количество катионов в пересчете на 23 аниона O⁻

Молярные доли, %

№ образца	3082/161,6											
	биметасоматические зоны											
Позиция	4											
№ анализа	НЫ-36	НЫ-38	Акт-41	Акт-40	НЫ-43	Акт-44	НЫ-50	НЫ-48	Акт-53	НЫ-55	НЫ-57	НЫ-60
SiO ₂	47,45	48,36	54,52	55,95	49,73	54,54	49,78	46,06	50,41	49,01	45,14	45,37
TiO ₂	0,71	0,22	0,02	0,00	0,09	0,06	0,13	0,16	0,07	0,13	0,30	0,26
Al ₂ O ₃	7,76	6,19	1,17	0,73	3,16	1,92	4,24	5,46	2,48	5,45	8,81	7,17
FeO	15,46	14,58	10,46	10,00	12,46	10,77	14,08	14,60	11,03	13,52	17,90	17,19
MnO	0,49	0,35	0,39	0,34	0,39	0,40	0,41	0,43	0,45	0,48	0,43	0,53
MgO	12,99	13,81	17,21	18,22	15,40	16,38	14,35	13,49	15,01	15,14	10,90	11,28
CaO	12,47	12,64	13,37	13,13	13,42	13,32	12,94	12,42	12,26	13,08	12,36	12,40
Na ₂ O	0,77	0,55	0,08	0,07	0,24	0,14	0,38	0,50	0,22	0,45	0,74	0,55
K ₂ O	0,47	0,31	0,03	0,01	0,09	0,04	0,22	0,25	0,12	0,27	0,59	0,42
Сумма	98,57	97,01	97,25	98,45	94,98	97,57	96,53	93,37	92,05	97,53	97,17	95,17
Количество катионов в пересчете на 23 аниона O ²⁻												
Si	6,95	7,16	7,84	7,89	7,50	7,82	7,39	7,14	7,69	7,20	6,82	6,99
Al ^{IV}	1,05	0,84	0,16	0,11	0,50	0,18	0,61	0,86	0,31	0,80	1,18	1,01
ΣR ^{IV}	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	0,29	0,24	0,04	0,02	0,06	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,38	0,29
Ti	0,08	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03
Fe ³⁺	0,31	0,28	0,01	0,03	0,02	0,00	0,18	0,34	0,05	0,31	0,34	0,30
Fe ²⁺	1,59	1,52	1,24	1,14	1,54	1,29	1,56	1,54	1,36	1,35	1,93	1,91
Mn	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
Mg	2,83	3,04	3,69	3,83	3,46	3,50	3,17	3,11	3,41	3,31	2,45	2,59
ΣR ^{VI}	5,16	5,14	5,02	5,06	5,14	4,99	5,11	5,20	5,03	5,18	5,19	5,19
Ca	1,96	2,00	2,06	1,98	2,17	2,04	2,06	2,06	2,00	2,06	2,00	2,04
Na	0,22	0,16	0,02	0,02	0,07	0,04	0,11	0,15	0,07	0,13	0,21	0,16
K	0,09	0,06	0,01	0,00	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,05	0,11	0,08
ΣR ^{VIII}	2,27	2,22	2,09	2,00	2,26	2,09	2,21	2,26	2,09	2,24	2,32	2,28
Мольные доли, %												
SiO ₂	47,61	48,59	52,23	52,62	49,71	52,49	49,65	47,96	51,79	48,42	46,79	47,50
TiO ₂	0,54	0,17	0,01	0,00	0,07	0,04	0,10	0,13	0,05	0,10	0,23	0,20
Al ₂ O ₃	4,59	3,67	0,66	0,40	1,86	1,09	2,49	3,35	1,50	3,17	5,38	4,42
FeO	12,97	12,25	8,38	7,86	10,42	8,67	11,74	12,71	9,48	11,17	15,52	15,05
MnO	0,42	0,30	0,32	0,27	0,33	0,33	0,35	0,38	0,39	0,40	0,38	0,47
MgO	19,43	20,69	24,58	25,54	22,95	23,50	21,34	20,94	22,99	22,30	16,84	17,60
CaO	13,40	13,61	13,72	13,23	14,37	13,73	13,83	13,86	13,50	13,84	13,73	13,91
Na ₂ O	0,75	0,54	0,07	0,06	0,23	0,13	0,37	0,50	0,22	0,43	0,74	0,56
K ₂ O	0,30	0,20	0,02	0,01	0,06	0,02	0,14	0,17	0,08	0,17	0,39	0,28
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,64	0,67	0,75	0,77	0,69	0,73	0,67	0,67	0,72	0,71	0,56	0,58

Таблица 6

Статистические параметры распределения K_2O и Na_2O (% моль) в породообразующих минералах при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред

Компоненты	Минералы	Цемент и примыкающие биметасоматические зоны			Галька и примыкающие биметасоматические зоны			t-критерий Стьюдента	Вероятность значимости различий в концентрации компонентов
		n	X	S	n	X	S		
K_2O	Амфибол	14	0,31	0,19	11	0,14	0,12	2,589	0,98
K_2O	Биотит	3	6,35	0,22	5	6,80	0,12	3,895	0,99
Na_2O	Амфибол	15	0,62	0,26	10	0,33	0,23	2,889	0,99
Na_2O	Плагиоклаз	8	7,09	0,33	–	–	–	–	–

Примечание: n – количество анализов, X – среднее арифметическое, S – среднеквадратическое отклонение

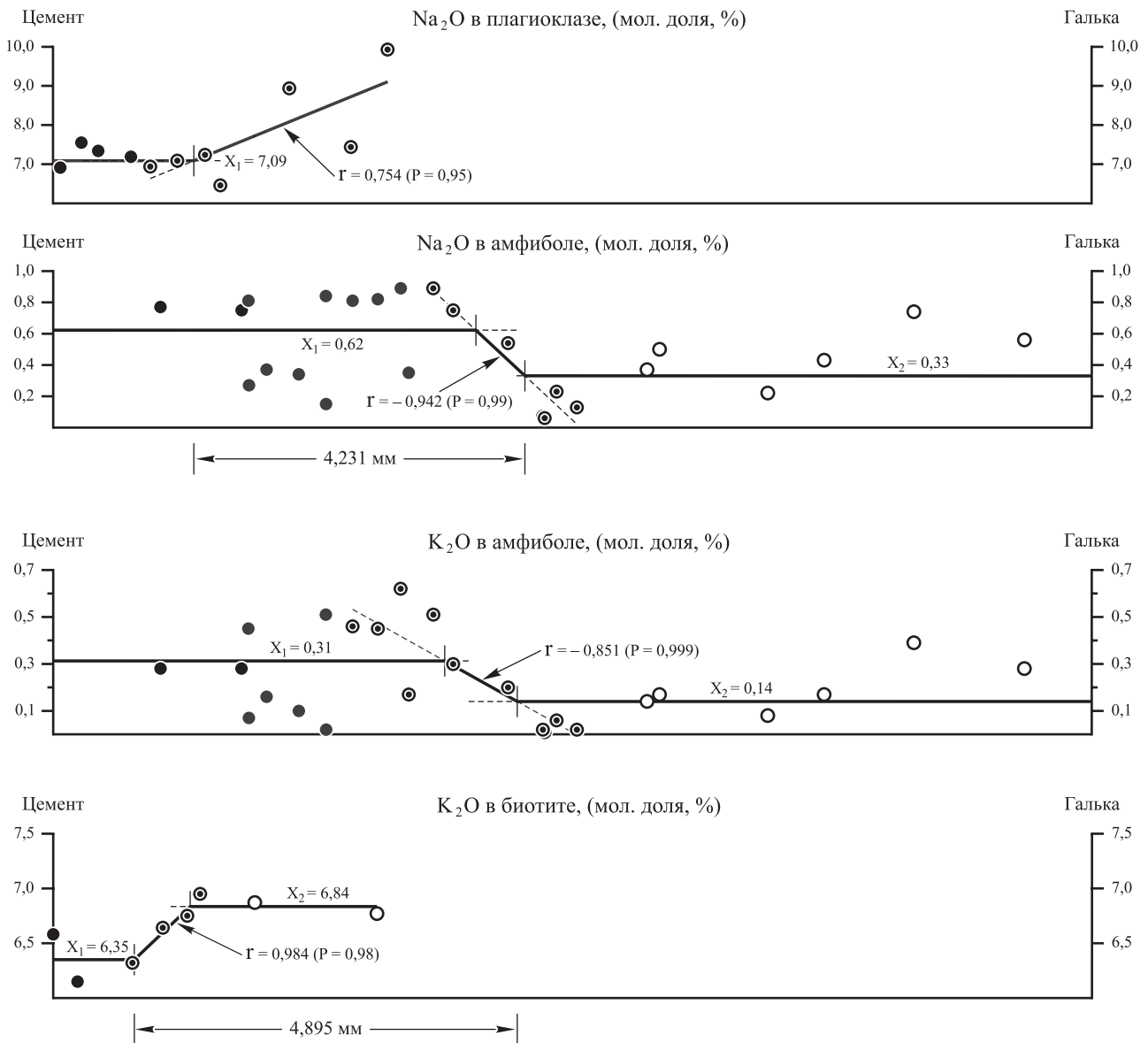


Рис. 12. Изменение концентрации Na_2O и K_2O в плагиоклазе, амфиболе и биотите и ширина зон диффузионного массопереноса этих компонентов при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред:

r – коэффициент корреляции, *P* – вероятность значимости корреляции,
X – средние концентрации компонентов в сопряженных зонах со стороны цемента (1) и гальки (2)

Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при метаморфизме полимиктовых конгломератов между цементом и гальками возникают зоны биметасоматического взаимодействия. Метасоматические преобразования пород были вызваны контактово-термальным воздействием внедряющейся Роговской интрузии и протекали при давлении около 2 кбар и температуре 450–540 °С.

Изучение фазовых равновесий при взаимодействии двух типов алюмосиликатных высококальциевых и силикатно-карбонатных пород позволило установить, что состав минеральных парагенезисов реакционных зон и направленность диффузии компонентов определяются спецификой химического состава реагирующих сред. Выявленные закономерности постепенного изменения состава большинства минералов в различных зонах реакционного взаимодействия сред указывают на диффузионную природу наблюдаемой метасоматической зональности и ее формирование в результате массопереноса компонентов через застойные поровые растворы.

Установлено, что в пределах областей реакционного взаимодействия всегда наблюдаются биметасоматические зоны с минимальным количеством минеральных фаз, которые фиксируют положение исходного контакта реагирующих сред. Положение этих зон в пределах биметасоматических колонок определяет симметричность строения последних и обусловлено различным соотношением количества встречно диффундирующих компонентов.

По закономерностям изменения концентраций K_2O в амфиболе и биотите и Na_2O в плагиоклазе и амфиболе установлена ширина зон диффузионного массопереноса этих компонентов, на основании чего рассчитано соотношение их коэффициентов диффузии ($\approx 1,3$), свидетельствующее о более высокой скорости миграции калия относительно натрия при биметасоматическом взаимодействии глиноземистой алюмосиликатной высококальциевой и низкоглиноземистой силикатно-карбонатной сред.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: «Университеты России» (проекты УР.09.01.004 и УР.09.01.026) и РФФИ (проект 03-05-64071).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коржинский, Д.С. Открытые системы с вполне подвижными компонентами и правило фаз / Д.С. Коржинский // Изв. АН СССР. Серия геологическая. – 1949. – № 2. – С. 3–14.
2. Коржинский, Д.С. Очерк метасоматических процессов / Д.С. Коржинский // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 334–456.
3. Коржинский, Д.С. Теория метасоматической зональности / Д.С. Коржинский. – М.: Наука, 1969. – 128 с.
4. Жариков, В.А. Геология и метасоматические явления скарново-полиметаллических месторождений Западного Кармазара / В.А. Жариков // Тр. ИГЕМ. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – Вып. 14. – 374 с.

5. Маракушев, А.А. Проблемы минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород / А.А. Маракушев. – М.: Наука, 1965. 327 с.
6. Vidale, R. Metasomatism in a chemical gradient and the formation of calc-silicate bands / R. Vidale // Am. J. Sci. – 1969. – 267. – P. 857–874.
7. Поспелов, Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза / Г.Л. Поспелов. – Новосибирск: Наука, 1973. – 355 с.
8. Шабынин, Л.И. Формация магнезиальных скарнов / Л.И. Шабынин. – М.: Наука, 1973. – 214 с.
9. Жариков, В.А. Основы физико-химической петрологии / В.А. Жариков. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 417 с.
10. Перцев, Н.Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород / Н.Н. Перцев. – М.: Наука, 1977. – 256 с.
11. Brady, J.H. Metasomatic zones in metamorphic rocks / J.H. Brady // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1977. – V. 41. – P. 113–125.
12. Жариков, В.А. Метасоматизм и метасоматические породы / В.А. Жариков, В.Л. Русинов, А.А. Маракушев и др. – М.: Научный мир, 1998. – 490 с.
13. Jamtveit, B. Contact metamorphism of layered shale-carbonate sequences in the Oslo Rift. I. Buffering, infiltration, and the mechanisms of mass transport / B. Jamtveit, K.B. Nurminen, D.E. Stijfhoorn // J. Petrol. – 1992. – V. 33. – № 2. – P. 377–422.
14. Bickle, M.J. Fluid Flow and Diffusion in the Waterville Limestone, South-Central Maine: Constraints from Strontium, Oxygen and Carbon Isotope Profiles / M.J. Bickle, H.J. Chapman, J.M. Ferry et al. // J. Petrol. – 1997. – V. 38. – № 11. – P. 1489–1512.
15. Русинов, В.Л. Периодическая метасоматическая зональность в пироксен-волластонитовых скарнах / В.Л. Русинов, П.Ф. Кудря, И.П. Лапутина и др. // Петрология, 1994. – Т. 2. – № 6. – С. 570–586.
16. Полякова, Т.Н. Минеральные парагенезисы и условия метаморфизма раннепротерозойских известково-силикатных пород Тим-Ястребовской структуры (ВКМ) / Т.Н. Полякова // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2001. – № 12. – С. 229–233.
17. Савко, К.А. Зональный метаморфизм и петрология метapelитов Тим-Ястребовской структуры, Воронежский кристаллический массив / К.А. Савко, Т.Н. Полякова // Петрология. – 2001. – Т. 9. – № 6. – С. 593–611.
18. Polyakova, T.N. Evolution of Early Proterozoic metamorphism within Tim-Yastrebovsky Paleorift, Voronezh crystalline massif, East-European Platform: metapelite systematics, phase equilibrium, and P-T conditions / T.N. Polyakova, K.A. Savko, V.Yu. Skryabin // H. Thomas (Ed.) Metamorphism and Crustal Evolution, published by Atlantic Publishers and Distributors. – New Delhi. – 2005. – P. 26–72.
19. Скрябин, В.Ю. Минералого-петрохимическая систематика метapelитов Тим-Ястребовской структуры / В.Ю. Скрябин, Т.Н. Полякова // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2003. – № 1. – С. 85–92.
20. Граменицкий, Е.Н. Экспериментальная и техническая петрология / Е.Н. Граменицкий, А.П. Котельников, А.М. Батанова и др. – М.: Научный мир, 2000. – 416 с.
21. Ganguly, J. Garnet and clinopyroxene solid solutions, and geothermometry based on Fe-Mg distribution coefficient / J. Ganguly // Geochim. Cosmoch. Acta. – 1979. – V. 43. – P. 1021–1029.
22. Ellis, D.J. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria / D.J. Ellis, D.H. Green // Contr. Miner. and Petrol. – 1979. – V. 71. – P. 13–22.

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

24. *Bishop, F.S.* The distribution of Fe²⁺ and Mg between co-existing ilmenite and pyroxene with applications to geothermometry / F.S. Bishop // *Amer. J. Sci.* – 1980. – V. 280. – P. 46–77.

25. *Anderson, D.J.* New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer / D.J. Anderson, D.H. Lindsley // *EOS Transactions.* – 1985. – V. 66. – P. 416.

26. *Glassley, E.W.* The role of CO₂ in the chemical modification of deep continental crust / E.W. Glassley // (Carmichael J.S.E.,

Pers. comm.). *Geochim. Cosmoch. Acta.* – 1983. – V. 47. – № 3. – P. 597–616.

27. *Spear, F.S.* Amphibol-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz / F.S. Spear // *Contr. Miner. and Petrol.* – 1981. – V. 77. – № 4. – P. 355–364.

28. *Perkins, D.III* Charnockite geobarometers based on co-existing garnet-pyroxene-plagioclase-quartz / D.III Perkins, R.C. Newton // *Nature.* – 1981. – V. 292. – № 9. – P. 144–146.

29. *Полякова, Т.Н.* Фазовые равновесия и физико-химические условия метаморфизма карбонатных пород на контакте с интрузиями стойло-николаевского комплекса / Т.Н. Полякова, В.Ю. Скрябин, К.А. Савко // *Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология.* – 2002. – № 2. – С. 46–58.

