

УДК 552 : 553.22

Трощенко В.Н.

Проблема образования щелочных метасоматитов в тектоническом и физико-химическом аспектах

Рассмотрена модель щелочного метасоматоза гранитоидов и докембрийских железистых кварцитов за счет щелочей из поровых растворов вмещающих пород. Расчетным путем показано, что в связи с этим не требуется привнос натрия из внешних источников.

Щелочные породы занимают особое место среди метасоматитов как по тектоно-механическим, так и по физико-химическим условиям образования. По данным многих работ, установлена их приуроченность к сложно дислоцированным стратифицированным комплексам, к интрузивным массивам гранитоидов, диоритов, габбро, гипербазитов, сиенитов и агпаитных пород, к жильным и камерным пегматитам, к ультраметаморфическим комплексам, к вулканическим сооружениям и к региональным разломам [3, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 31, 32, 37]. Щелочные метасоматиты обнаружены в разновозрастных геологических формациях от раннего докембрия до позднего фанерозоя. При всем разнообразии геологических условий время проявления щелочного метасоматоза, как правило, совпадает с изменением тектонического режима сжатия на режим релаксации и растяжения. Об этом свидетельствует размещение щелочных метасоматитов в рубцовых трещинах и участках брекчирования зон тектонических разрывов, в апикальных частях купольных поднятий, замках складок и в полостях отслоения стратифицированных комплексов, в трещинах концентрических, радиальных и конических систем вулканических аппаратов и интрузивных массивов, а также во внешних зонах и во внутренних частях пегматитовых камер. Режим растяжения проявлялся в одних случаях локально, эпизодически на фоне общего сжатия, складкообразования, взбросо-сдвиговых смещений (отслоения в стратифицированных толщах, замки складок волочения, рубцовые трещины, усадочные полости магматических массивов), а в других случаях – регионально (перестройка общего плана тектонических деформаций, сводовое растяжение купольных структур, контракция крупных интрузивных массивов, кальдерообразование) [27]. Отсутствие тектонического стресса сказалось и на текстурных особенностях метасоматитов в виде неупорядоченной ориентировки породообразующих кристаллов, появления таких форм как друзы, щетки, зоны геометрического отбора и т.п. При этом предшествующие

во времени минеральные агрегаты часто соответствуют S- и В-тектонитам, включая не только метаморфические, но и гранитоидные образования. Тектоно-механическая обстановка имеет значение и для физико-химических условий метасоматоза.

Щелочные метасоматиты возникли при высокой активности оснований как главного фактора процесса, в отличие от иных метасоматитов, которые формировались при высокой активности кислот, крайне разнообразных. В этом плане щелочной метасоматоз может быть поставлен в один ряд с магнезиальным и железистым в карбонатных породах и с железистым метасоматозом в оксидных породах. Щелочной метасоматоз проявился в алюмосиликатных, силикатных и ферросиликатных породах, причем исследователи отмечают главную особенность состава метасоматитов – зависимость от петрохимических особенностей замещаемых объектов [10, 16, 18, 37]:

- гранитоиды преобразуются в кварц-микроклиновые, кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты и в кварц-содержащие альбититы;
- сиениты – в фениты и в альбититы с рибекитом и (или) эгирином;
- нефелиновые сиениты – в альбититы с нефелином и содалитом;
- базиты и диориты – в альбититы с эпидотом и актинолитом;
- средние и основные вулканы – в альбитофиры и кератофиры;
- гипербазиты – в жадеититы;
- метаморфические сланцы – в альбит-хлорит-слюдяные породы;
- железисто-кремнистые метаморфиты – в эгириниты и рибекитовые метасоматиты.

Следовательно, в ходе преобразований сохранялась в большинстве случаев алюмосиликатная или в некоторых случаях силикатная кислотная матрица породы, но заменялись основания: кальций, магний и железо на натрий и калий. Однако избыточные основания замещаемой породы в какой-то мере усваивались в составе эгирина, рибекита (крокидолита), жадеита, эпидота, актинолита и других минералов. В некоторых случаях не только сохранялись, но и концентрировались примесные элементы, что приводило к возникновению разнообразных рудоносных щелочных метасоматитов [2, 4, 12, 21].

Избыточная кремнекислота замещаемых пород и дополнительные кислотные компоненты (HCO_3^- , Cl^- , F^- , HPO_4^{2-} и др.) выносились из очага щелочного метасоматоза на периферию и переотлагались, чем объясняются зональные изменения пород, которые вмещают щелочные метасоматиты [10, 15, 18, 32]. Здесь зонально чередуются окварцованные, карбонатизированные, ослюденелые, грейзенизированные с флюоритом, скаполитизированные, эпидотизированные, турмалинизированные, сульфидизированные и другие породы иного систематизационного ряда, обусловленного активностью кислот. Тот или иной конкретный набор зон, вероятно,

контролируется как составом активных агентов, так и температурным режимом.

Известно, что температура щелочного метасоматоза охватывает широкий интервал значений от 700 до 150°C [28, 29]. Ее влияние считается важной причиной зонального распределения альбита и калиевого полевого шпата в телах метасоматитов, в первую очередь высокотемпературных. Изменения химических потенциалов щелочей и относительных парциальных свободных энергий хлоридов щелочей в водных растворах при уменьшении температуры и давления ведут к выделению из растворов соединений калия прежде чем натрия. Это может объяснить неравномерное распределение альбитовых и калишпатовых агрегатов в геологическом пространстве и времени. Однако при средних и умеренных температурах различия упомянутых характеристик калия и натрия существенно смягчаются. В соответствующих метасоматитах роль калиевых полевых шпатов резко снижается; они уступают альбиту. Калий-содержащие минералы представлены, главным образом, слюдами, которые сконцентрированы в зонах и участках тонкопористых пород. Вероятно, в этом случае уместно учитывать различия ионных радиусов щелочей и влияние фильтрационного эффекта, благодаря которому относительно крупные ионы калия могут накапливаться в менее проницаемых участках замещаемых пород [17, 19]. Таким образом, характерна сопряженность в пространстве и времени метасоматоза при активном поведении оснований (щелочей) с метасоматозом при активном поведении кислот. Последнее может быть производным из первого, но не исключена обратная связь и взаимная «поддержка» процессов двух типов.

Для превращения замещаемых разнообразных пород в щелочные метасоматиты требуется усвоение кристаллическим веществом значительных количеств щелочей, главным образом, натрия, реже калия. Предполагается заимствование щелочей из водных растворов, которые поступили в замещающую породу извне способом инфильтрации или из застойных растворов в порах пород, куда щелочи были привнесены из внешних источников способом диффузии. В соответствии с господствующими представлениями, поступление щелочей было связано с некоторыми геологическими процессами, которые завершились непосредственно перед метасоматозом или протекали одновременно с ним на более или менее значительном удалении. Щелочи связывают с [2, 3, 7, 10, 14, 15, 24, 32, 37]:

1) постмагматическими растворами, которые выделялись при становлении гранитоидов, сиенитов, габброидов, гипербазитов и других пород или отщеплялись при пегматитообразовании;

2) гидротермальными растворами, активизированными при вулканизме;

3) мобилизацией растворов при метаморфизме, ультраметаморфизме и гранитизации;

4) генерацией растворов при дифференциации и дегазации мантийного вещества.

Допускается миграция через поры и трещины пород значительных масс вещества. Отмечается значительный перерыв во времени образования между замещаемыми породами и метасоматитами [18].

С другой стороны известно, что поры и трещины пород на глубинах, где происходят метасоматические процессы, постоянно заполнены водными растворами с высокой степенью минерализации. В их составе находятся разнообразные кислоты и основания, среди последних, главным образом, натрий и калий [5, 6, 22, 25, 26, 35]. Но петрохимические оценки баланса вещества при метасоматозе не включают в расчет состав растворов. Однако они вместе с кристаллическими веществами вмещающей породы составляют открытую физико-химическую систему (порода + раствор), которая при неизменных термодинамических параметрах неопределенное время пребывает в стабильном состоянии. При этом реакции между фазами системы носят обратимый характер, в связи с чем твердые и жидкие фазы не изменяют состав [23]. Под влиянием тектоники или магматизма уровень давления и (или) температуры может измениться, вследствие этого реакции между фазами могут принимать необратимый характер, т.е. система может выйти из стабильного состояния и начать эволюционировать с изменением состава фаз. Поровые растворы переходят в состояние недосыщенности одними компонентами системы и насыщенности иными, а их взаимодействие с кристаллическими фазами принимает характер обменных реакций.

Установление режима растяжения в связи с проявлением тектонических процессов или контракции сопровождается возникновением зон брекчий, трещин, полостей отслоения, повышением пористости пород. Это влечет за собой падение давления в ограниченном геологическом объеме и сопряженное с ним уменьшение температуры. Раствор при этом переходит в состояние насыщения щелочами; в нем происходит структурная перестройка, в связи с этим повышается показатель щелочности. В контакте со щелочным флюидом растворяется кварц, многие алюмосиликаты и силикаты, а щелочи из раствора переходят в устойчивые кристаллические фазы.

Для открытых физико-химических систем характерно неравенство концентраций компонентов в разных частях общего объема и неравномерность значений термодинамических параметров. Вследствие этого начало необратимых реакций ожидается не во всем объеме, а в некотором его участке, где достигнуты оптимальные условия. С развитием реакций возникает перепад концентраций щелочей между очагом метасоматоза и прилегающими частями системы, что служит причиной миграции щелочей к очагу. Благодаря этому расширяется очаг реакций, а с другой стороны – возникает перепад концентрации кислотных веществ, переходящих в раствор, создаются условия для

встречного их переноса из очага в окружающие части системы. Там, в свою очередь, создаются условия для отложения кислотных компонентов (главным образом, кремнекислоты) в виде твердых фаз (кварц) и перехода оснований (в первую очередь, щелочей) из твердых фаз в раствор. В идеально изотропной среде процесс, вероятно, завершается формированием вокруг очага разных по составу концентрических зон измененных пород, число которых зависит от количества компонентов, вовлеченных в миграцию. Реальная геологическая обстановка, как правило, анизотропна, характеризуется более чем одним единичным направлением, в связи с чем идеальная концентрическая зональность не возникает. Данная модель, построенная в общих чертах, требует подкрепления количественными оценками.

Альбитизация гранитоидов и иных петрохимически близких к ним пород является наиболее распространенным проявлением щелочного метасоматоза и объясняется привнесением натрия. В неизмененных гранитах содержание Na_2O составляет 3,00-4,92 мас.%, с учетом вариаций показателя общей щелочности. В альбититах содержание Na_2O существенно выше – 6,00-9,80% [16, 33, 34]. Объемная масса гранитов от 2,65 до 2,68; альбититов – 2,54-2,66 г/см³. Эффективная пористость гранитов 0,42-0,85; альбититов – 0,54-3,50 % [12, 20]. Количество Na_2O в 1000 см³ гранита может составлять от 2,50 до 131,80 г, а в таком же количестве альбитита – 152,40-260,68 г, что отвечает содержанию Na^+ , соответственно, 1,86-97,79 и 113,06-193,38 г. Требуемый для альбитизации привнос Na^+ изменяется от 15,27 до 191,52 г. В обстановке тектонического растяжения и брекчирования эффективная пористость возрастает до 10-20 % в брекчиях, т.е. при заполнении пор в 1000 см³ породы содержится 100-200 см³ раствора. О его составе можно судить лишь приблизительно, опираясь на результаты исследований жидких включений в минералах и вод термальных источников [1, 13, 22, 31].

Современные гидротермы вулканических областей характеризуются общей минерализацией 2,5-3,5 г/л, преобладанием Na^+ среди катионов. Из них отлагаются среди многих других минералов – альбит и адуляр. Жидкость вакуолей в жильном кварце содержат Na^+ до 8,0-20,0 г/л и более. Это «отработанные» растворы, уже отложившие часть своего минерального запаса. С учетом этих данных находим, что в 1000 см³ брекчированного гранита поровые растворы могут содержать минимально от 0,8 до 4,0 г Na^+ и в начале процесса могут обеспечить потребность процесса альбитизации в натрии на 2,1-5,2%. Для развития процесса необходим диффузионный перенос натрия из тех частей массива, которые окружают очаг альбитизации. Следует также учесть значимую вероятность в порах пород насыщенных хлоридами растворов, о чем свидетельствует присутствие кристаллов галита в составе многофазных микровключений в породообразующих

минералах. При этом условии концентрация NaCl составляет 400 г/л при температуре 50° и увеличивается с повышением температуры. В 1000 см³ породы при пористости 10% в растворе может быть 40 г NaCl или 15,73 г Na⁺.

Значительно слабее в сравнении с апогранитовыми альбититами распространены проявления эгиринизации железистых кварцитов в докембрийских железорудных формациях. Но количество натрия в железистых породах при натриевом метасоматозе изменяется более существенно [9, 30]. Содержание Na₂O в неизменных железистых кварцитах и различного состава сланцах изменяется от $n \cdot 10^{-3}$ до 1 мас.%. В эгириновых метасоматитах содержание Na₂O достигает 6,0 мас.%, что соответствует расчетному значению привноса. Учитывая объемные массы железистого кварцита (3,66 г/см³), метаморфического сланца (3,22), эгиринита (3,50), при эффективной пористости этих пород, соответственно, 0,3; 0,4 и 2,6%, а брекчированного железистого кварцита 10,0%, находим, что при эгиринизации 1000 см³ брекчированного железистого кварцита в кристаллическую фазу поступало 155,8 г Na⁺. При содержании в поровом растворе Na⁺ 10 г/л в начале процесса могло быть отложено его не более 1,0 г в принятом объеме. Поровые растворы железистых кварцитов и вмещающих сланцев могли быть насыщены хлоридами натрия, о чем свидетельствует присутствие в этих породах галита и гидрокарбонатов натрия [8]. В рамках принятых условий для полного обеспечения натрием необходимо десятикратное увеличение его поступления в очаг процесса, что вполне допускают как скорость диффузии щелочи в насыщенных водой пористых средах, так и вероятная продолжительность развития эгиринизации. Геологическая обстановка соответствующих месторождений, в частности приуроченность к региональным разломам, которые далеко проникают в древние гранито-мигматитовые массивы, обрамляющие и подстилающие железисто-кремнистые формации, благоприятствует крупномасштабному массообмену в системе пород и поровых растворов.

Поскольку поровые растворы постоянно присутствуют в породах на уровнях глубинности, допускающих существование пор, заполненных жидкостью, и при этом практически всегда содержат щелочи в высоких концентрациях, то в значительной мере смягчается проблема внешних источников щелочей; по крайней мере, для процессов, которые протекают в регрессивном термодинамическом режиме. Не усложняется и проблема стадийности формирования щелочных метасоматитов, что уже нашло достаточное объяснение как со стороны тектоники, так и физической химии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранова Н.Н., Барсуков В.Л. О карбонатной форме переноса свинца гидротермальными растворами // Геохимия. – 1965. – №9. – С. 45-50.

2. **Белевцев Я.Н., Стрыгин А.И., Коваль В.Б. и др.** Генетическая модель месторождений уран-альбитовой формации / Эндогенное рудообразование // Москва: Наука, 1985.– С. 81-95.
3. **Беус А.А., Северов Э.А., Ситни Д.А., Субботин К.Д.** Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты) // Москва: Изд. АН СССР, 1982.– 195 с.
4. **Галецкий Л.С., Білоус А.І.** Петрологія і геохімічні особливості рідкіснометальних польовошпатових метасоматитів Українського щита / Проблеми геологічної науки та освіти в Україні // Львів, 1995.– С. 172-174.
5. **Ганев И.Г.** О возможной форме переноса кремнезема в гидротермальных растворах // Советская геология.– 1963.– №12.– С. 23-27.
6. **Германов А.И.** О возможном участии подземных вод в гидротермальном рудообразовании // Известия АН СССР. Серия геологическая.– 1953.– №6.– С. 31-33.
7. **Гинзбург А.И., Фельдман Л.Г.** Геохимическая направленность процессов формирования редкометальных гранитов и пегматитов // I Международный геохимический конгресс // Москва, 1972.– Т. III, кн. 2.– С. 261-274.
8. **Євтєхов В.Д., Буанані А.** Мінералогічне обґрунтування екологічно прийнятної технології зменшення вмісту лугів у багатих залізних рудах Кривбасу / Технологічні ландшафти: структура, фракціонування, оптимізація. // Кривий Ріг, 1996.– Ч. III.– С. 8.
9. **Євтєхов В.Д., Мядзель В.В., Харитонов В.М.** Морфологічні відміни егірину Північного району Кривбасу // Відомості Академії гірничих наук України.– 1997.– №4.– С. 10-12.
10. **Казанский В.И., Омеляненко Б.И., Прохоров К.В.** О вертикальной зональности ураноносных натровых метасоматитов / Метасоматизм и рудообразование // Москва: Наука, 1974.– С. 92-100.
11. **Казанский В.И., Прохоров К.В.** Структурный контроль щелочных метасоматитов докембрия / Проблемы металлогении докембрия // Ленинград: Наука, 1978.– С. 122-131.
12. **Кейльман Г.А., Золоев К.К.** Изучение метаморфических комплексов / Москва: Недра, 1989.– 206 с.
13. **Кейльман Г.А., Панин Н.Н.** Метаморфизм и метасоматоз / Метасоматические процессы в докембрийских толщах // Санкт-Петербург: Наука, 1991.– С. 28-37.
14. **Кононов Ю.В.** Метасоматиты центральной части Украинского щита // Киев: Наукова думка, 1970.– 159 с.
15. **Краснов К.С.** Структура растворов и радиусы ионов электролитов / Рост кристаллов // Москва: Наука, 1965.– Т. V.– С. 81-92.
16. **Коваленко В.И., Коваль П.В., Пополитов Э.И. и др.** Геохимические типы апогранитов, их зональность, условия формирования и связь с ними редкометальной минерализации / Проблемы метасоматизма // Ленинград: Наука, 1969.– С. 218-228.
17. **Коваль П.В.** Петрология и геохимия альбитизированных гранитов // Новосибирск: Наука, 1975.– 257 с.
18. **Кушев В.Г.** Щелочные метасоматиты докембрия // Ленинград: Недра, 1972.– 188 с.
19. **Лапухов А.С.** О диффузионном переносе вещества в трещинных полостях и сквозь межзерновое пространство водонасыщенных горных пород // Геология и геофизика.– 1966.– №12.– С. 7-11.
20. **Любимов Н.И., Носенко Л.И.** Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов // Москва: Недра, 1978.– 285 с.
21. Минералого-геохимические и генетические особенности редкометальных апогранитов / Ред. **К.Д.Субботин** // Москва: Наука, 1965.– 116 с.
22. **Моисеенко В.Г., Фатьянов И.И.** Геохимия золота / Международный геологический конгресс. XXII сессия. Проблема 10. Геохимия // Москва, 1967.– С. 50-59.
23. **Николис Г., Пригожин И.** Самоорганизация в неравновесных системах // Москва: Мир, 1979.– 512 с.
24. **Никольский А.П.** Генезис альбититов Украинского щита / Метасоматические процессы в докембрийских толщах // Санкт-Петербург: Наука, 1991.– С. 211-227.
25. **Овчинников Л.Н., Масалович А.М.** Состав, внутреннее строение и некоторые свойства гидротермального рудообразующего раствора / Проблемы метасоматизма // Москва: Недра, 1970.– С. 25-33.
26. **Овчинников Л.Н., Шляпников Д.С., Шур А.С.** Мобилизация и перенос вещества при эндогенном рудообразовании / Проблемы генезиса руд // Москва: Недра, 1964.– С. 37-49.
27. **Осинов М.А.** Контракция гранитоидов и эндогенное минералообразование // Москва: Недра, 1974.– 157 с.

28. *Перчук Л.Л.* Фазовое соответствие в системе нефелин-полевой шпат-водный раствор / Метасоматизм и другие вопросы физико-химической петрологии // Москва: Наука, 1975.– С. 53-95.
29. *Перчук Л.Л., Андрианова З.С.* Термодинамика равновесия щелочного полевого шпата с водным раствором (K, Na)Cl при 500-700°C и давлении 2000-1000 бар / Экспериментальные и теоретические исследования минеральных равновесий // Москва: Наука, 1968.– С. 37-92.
30. *Пирогов Б.И., Евтехов В.Д.* Щелочноземельные метасоматиты – контактово-реакционные образования в железистых породах Кривбасса / Генетические модели эндогенных рудных формаций // Новосибирск, 1981.– Т. III.– С. 70-71.
31. *Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Глеватских С.Ф. и др.* Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система // Вулканология и сейсмология.– 2002.– №4.– С. 1-19.
32. *Рудник В.А., Беляев Г.М., Терентьев В.М.* Закономерности формирования кварц-полевошпатовых метасоматитов зон региональных разломов / Проблемы метасоматизма // Москва: Недра, 1970.– С. 261-274.
33. *Соловьев С.П.* Химизм магматических горных пород и некоторые вопросы петрохимии // Ленинград: Наука 1970.– 310 с.
34. Справочник по петрографии Украины / Ред. *И.С.Усенко* // Киев: Наукова думка, 1975.– 577 с.
35. *Ходьков А.Е.* О природе глубинных хлор-кальциевых рассолов // Вестник Ленинградского государственного университета.– 1964.– Вып.4.– №24.– С. 11-27.
36. *Шмакин Б.М., Куфтырева В.А.* Стадийность метасоматических процессов в слюдоносных пегматитах и вмещающих их породах и критерии определения кислотности-щелочности постмагматических растворов / Физико-химические условия метаморфизма и метасоматоза // Новосибирск: СО АН СССР.– 1963.– С. 28-29.
37. *Юдин М.И.* Альбитсодержащие кристаллические сланцы хребта Борус // Известия Томского политехнического института.– 1963.– Т. 121.– С. 64-74.

ТРОЩЕНКО В.М. Проблема утворення лужних метасоматитів у тектонічному і фізико-хімічному аспектах.

РЕЗЮМЕ. Формування лужних метасоматитів в умовах регресивного термодинамічного режиму відбувалось з використанням лугів з порових розчинів вмещаючих порід. У зв'язку з цим не потрібним було принесення речовини з зовнішніх джерел.

ТРОЩЕНКО В.Н. Проблема образования щелочных метасоматитов в тектоническом и физико-химическом аспектах.

РЕЗЮМЕ. Формирование щелочных метасоматитов в условиях регрессивного термодинамического режима происходило с использованием щелочей из поровых растворов вмещающих пород. В связи с этим не требовался привнос вещества из внешних источников.

TROSHCHENKO V.M. The problem of alkaline metasomatites formation in terms of tectonic and physchal-chemical aspects.

SUMMARY. Alkaline metasomatites formation in conditions of regressive thermodynamic regime occurred with use of alkalis from pore solutions of enclosing rocks. In this connetion the substance supply from external sources was not required.

*Надійшла до редакції 25 листопада 2004 р.
Представив до публікації проф. В.Д.Євтехов.*