

Раздел 3: ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ПОРОД

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ЛИТОГЕНЕЗ В ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННОГО И ДРЕВНЕГО ВУЛКАНИЗМА

Коробов А.Д., Рихтер Я.А.

*Саратовский государственный университет, г. Саратов,
E-mail: korobov@sgu.ru*

При одновременном взаимодействии поверхностных и глубинных гидротерм с вмещающими породами возникает сложно построенная метасоматическая зональность, обнаруживающая, наряду с вертикальным, также черты горизонтального строения. Она представлена отдельными парами метасоматических зон (глубинных и поверхностных), каждая из которых обязана своим происхождением одному и тому же определенному набору летучих компонентов. Наличие такой генетической парности (глубинных и поверхностных «половин») определяет их взаимозависимость или корреляцию, при которой одна отдельно взятая зона не может существовать без другой.

HYDROTHERMAL LITHOGENESIS IN MODERN AND ANCIENT VOLCANISM AREAS

Korobov A.D., Rikhter Ya. A.

*Saratov State University, Saratov
E-mail: korobov@sgu.ru*

At simultaneous interaction of surface and underground hydrotherms with host rocks, there arises a complexly-formed metasomatic zonation, showing features of horizontal and vertical structuring. The zonation can be represented by separate pairs of metasomatic zones (underground and surface), each of which originates from the same certain set of volatile components. The presence of such genetic pairing of the underground and surface "halves" determines their interdependence and correlation, which excludes existence of any separate zone without another.

1. Введение

При взаимодействии горячих циркулирующих растворов с вмещающими породами осуществляются гидротермально-метасоматические процессы, которые сопровождаются изменением как самих растворов, так и пород. Изменение вулканогенно осадочных отложений, вызванное воздействием на них гидротермальных растворов, П.П. Тимофеевым, С.И. Набоко и В.А. Ерощевым-Шаком названы гидротермальным литогенезом [10].

Гидротермально-метасоматические процессы и их минеральные продукты широко распространены в земной коре. С ними связаны крупнейшие месторождения

неметаллических и рудных полезных ископаемых. Их изучению посвящены многочисленные работы, но несмотря на всю важность исследований, ответ на главный вопрос о природе метасоматической зональности в областях земного вулканизма не имеет однозначного толкования.

Существующие классификации метасоматитов основываются на идее кислотно-щелочной эволюции ювенильного потока гидротермальных растворов, предложенной Д.С. Коржинским. Согласно этим представлениям гидротермальный процесс контролируется только плутоническим магматизмом. Вместе с тем известно, что в разных структурах земной коры с широкомасштабной гидротермальной деятельностью магматические процессы многолики и по своей интенсивности проявлены неодинаково. В одних случаях доминируют плутонические, в других – вулканические явления, в третьих же в одинаковой степени как те, так и другие, т.е. имеют место вулкано-плутонические процессы, в понимании Е.К. Устиева [14]. При характеристике геодинамических обстановок важнейшим выражением взаимозависимости тектоники и магматизма служат отношения между вулканическими и плутоническими явлениями. Последние целиком и полностью контролируют гидротермальную активность, но в разных структурах земной коры в недостаточной степени выявлена зависимость специфики метасоматической зональности от этих процессов через состав и температуру гидротерм.

Известно, что гидротермальные системы формируются либо при нагревании вод в региональном тепловом поле в результате их глубокой циркуляции, либо при дополнительном поступлении в водоносные горизонты глубинного тепла, привносимого магмой или высокотемпературным газопаровым флюидом. Кроме трёх перечисленных факторов в областях наземного вулканизма значительное количество тепла, идущего на нагревание гидротермальных систем, генерируется за счет экзотермических метасоматических процессов, протекающих в породах, по которым циркулировали растворы, а также за счет тепла изливающихся лавовых потоков и пирокластических толщ. При этом в разных геологических обстановках доминируют те или иные энергетические факторы и соответствующий им набор летучих газообразных веществ, обуславливающих в каждом конкретном случае специфику гидротермального литогенеза. Это определило выбор исследуемых объектов на Курильских островах и Камчатке (островные вулканические дуги), в Забайкалье (дейтероорогенные области) и Тургайском прогибе (тафрогенные

районы).

По данной проблеме существуют следующие вопросы.

Во-первых, какие минералого-геохимические закономерности формирования продуктов изменения вулканогенных и вулканогенно-осадочных толщ характерны для выбранных регионов с присущими им режимами гидротермальных систем?

Во-вторых, прослеживается ли общая закономерность в гидротермальном литогенезе при сравнении этих трёх регионов гидротермальной деятельности?

Для ответа на эти вопросы в статье решаются две последовательные задачи.

1. Показать влияние условий образования гидротермальных систем на метасоматическую зональность и минералого-геохимические особенности гидротермалитов в каждом из выбранных регионов.
2. Провести сравнительный анализ состава и генезиса метасоматитов различных структурных элементов земной коры.

Касаясь первой задачи, рассмотрим специфику гидротермалитов в районах островных вулканических дуг, а также дейтероорогенных и тафрогенных областей.

2. Островные вулканические дуги

Сопряженность гидротермальной активности с вулcano-плутоническими процессами наблюдается в островодужных районах. Там гидротермальная деятельность протекает в двух обстановках [10]: а) когда выходы термальных вод на поверхность пространственно совпадают с генерирующими их вулcano-плутонами и б) когда существует пространственная разобщенность выхода термальных вод и вулcano-плутонов.

Типичным примером первой обстановки является вулкан Баранского (о.Итуруп, Курильская гряда). На его юго-западном склоне находится средне-позднеплейстоценовая кальдера Кипящая, в пределах которой сосредоточена одноименная гидротермальная система. Туфогенный материал кальдеры являетсяместилищем грунтовых вод, которые прогреваются аномально высоким тепловым потоком, связанным с неглубоко (> 2 км) залегающим крупным диоритовым телом. Выходы на поверхность перегретых гидротерм осуществляются по разломам. Фумарольные поля локализуются в термовыводящих структурах вулкана (зонах разломов) и в ареалах эффузивных магматических тел. Они приурочены к наиболее прогретым участкам и фиксируют восходящий газо-гидротермальный поток. Эти обстоятельства приводят к тому, что в кальдере Кипящая минералообразующие

процессы протекают при наиболее высоких температурах: в глубинных зонах месторождения они достигают 460°C, а на фумарольных полях - 250°C. Гидротермальная система находится на прогрессивном этапе развития [12].

Значительную роль глубинных факторов определяет характерные черты вертикальной зональности и минералого-геохимические особенности метасоматитов. В гидротермальной системе Кипящая в глубинных её частях формируются следующие зоны (по мере удаления от приконтактовых частей диоритового тела и снижения температуры растворов): монокварцевая (приконтактовые вторичные кварциты) → кварц-серицитовая → эпидот-хлорит-серицитовая (среднетемпературные пропилиты). На фумарольных полях в это же самое время образуются следующие зоны (по мере удаления от наиболее прогретых участков): моноопаловая (вторичные кварциты) → алунит (ярозит)-опаловая → каолинит-опаловая. Промежуточное положение между пропилитами и серными опалитами (вторичными кварцитами) занимают низкотемпературные гидротермальные аргиллизиты, представленные аргиллизированными пропилитами и смектитовыми глинами.

Развитие вторичных кварцитов, сульфатов и процессы аккумуляции щелочей свидетельствует о высокой активности галоидов (прежде всего Cl и сернистых соединений, главным образом SO_2) в гидротермальном процессе. Щелочи фиксируются в слюдах, гидрослюдах, иллит-смектитах в недрах гидротермальных систем и алуните (ярозите) на фумарольных полях (рис.1). Следовательно, для гидротермальных систем, деятельность которых напрямую контролируется вулканоплутоническими явлениями и которые находятся на прогрессивном этапе развития, характерна высокотемпературная галоидно-сернисто-углекислая стадия гидротермального процесса (рис. 2). При этом под действием одних и тех же летучих компонентов (галоидов и сернистых газов) в субвулканических условиях и на фумарольных полях одновременно образуются монокварцевая и моноопаловая зоны, с которыми ассоциируют два типа гидротермалитов – соответственно кварц-серицитовый (кварц-мусковитовый) и алунит-опаловый (ярозит-опаловый), связанные своим происхождением с фиксацией щелочей (см. рис. 1). Поэтому эти фации, как и пользующиеся наибольшим распространением на подобных месторождениях эпидот-хлорит-серицитовые (недра) и каолинит-опаловые (фумарольные поля) породы, объединённые попарно, необходимо рассматривать как взаимозависимые или корреляционные.

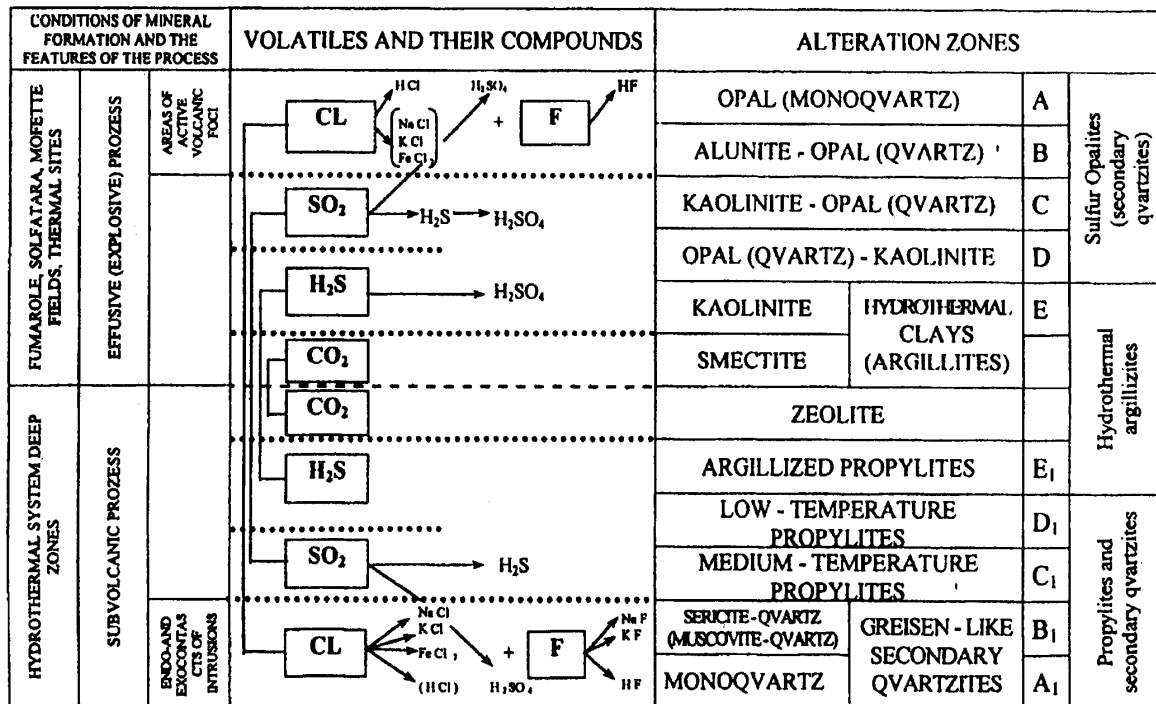


Рис. 1. Роль магматических эманаций в формировании метасоматических зон.

Вторая обстановка развития метасоматоза в условиях островных вулканических дуг отличается тем, что выходы термальных вод на поверхность пространственно разобщены с генерирующими их вулcano-плутонами. Характерным примером является Паужетское месторождение горячих вод, где зоны разгрузки гидротерм удалены более чем на 10 км от места их генерации в районе Камбального эруптивного центра. Это свидетельствует об ослабленном влиянии глубинных факторов (магматического очага и отделяющихся высокотемпературных эманаций) на формирование гидротермальной системы. Перечисленные обстоятельства обуславливают ограниченный набор летучих компонентов, участвующих в гидротермальной деятельности, и более низкие температуры минералообразования. На пра-Паужетке (Паужетском месторождении конца плейстоцена-начала голоцена [4]) в глубинных зонах системы они редко превышали 300°C, а на термальных площадках достигали 150°C. в настоящее время температуры на месторождении соответственно равны < 200°C и < 100°C. Это определяет специфику вертикальной зональности и минералого-геохимические особенности метасоматитов.

На пра-Паужетке в глубинных частях месторождения развивались среднетемпературные пропилиты, но доминировали низкотемпературные цеолитовые и, в меньшей степени, трансильванские пропилиты. На термальных площадках одновременно с пропилитами формировались каолинит-опаловые

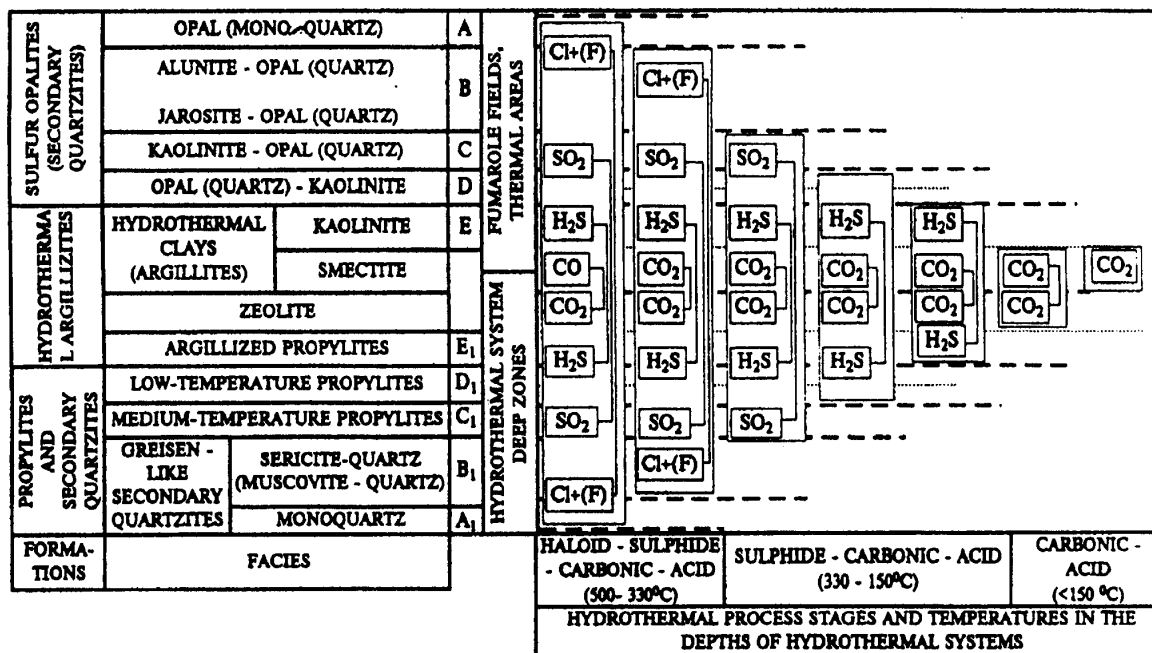


Рис. 2. Принципиальная схема поведения взаимозависимых метасоматических зон при снижении температуры и изменения состава летучих компонентов.

(спорадически встречаемые) и опал-каолинитовые (часто наблюдаемые) породы фации серных опалитов. Промежуточное положение в разрезе между пропилитами и серными опалитами занимает формация гидротермальных аргиллизитов. Она представлена снизу вверх по разрезу: аргиллизированными пропилитами) → высококремнистыми цеолитами → гидротермальными глинами, сложенными смектитами, сменяющимися на самой поверхности каолинитом [13].

Набор метасоматических зон свидетельствует о высокой активности сероводорода и углекислоты в гидротермальном процессе, который в условиях пра-Паужетки (прогрессивный этап) находился на сернисто-углекислой стадии своего развития.

В настоящее время на Паужетском месторождении, переживающем регрессивный этап развития, в недрах широкое распространение приобретают аргиллизированные пропилиты, синхронно с которыми на термальных площадках формируются каолинитовые и каолинит-смектитовые гидротермальные глины. Промежуточное положение в разрезе занимает зона высококремнистых цеолитов и диоктаэдрического смектита [6].

Набор метасоматических зон свидетельствует о том, что современная Паужетская гидротермальная система находится на рубеже сернисто-углекислой стадии минералообразования.

Таким образом, в обстановках, где влияние вулcano-плутонического магматизма на гидротермальный процесс было ослаблено, происходит сокращение набора магматических эманаций, задействованных в формировании терм и снижается температура минералообразования. Гидротермальные системы переживают сернисто-углекислую стадию развития (см. рис. 2). При этом возникают следующие взаимозависимые (корреляционные) метасоматические зоны: хлорит-альбитовая – каолинит-опаловая; цеолитовых и трансильванских пропилитов – опал-каолинитовая; аргиллизированных пропилитов – каолинитовых глин. Приведенные данные по Кипящему и Паужетскому месторождениям согласуются с важнейшей геохимической закономерностью, установленной Н.И. Наковником [11], Г.М. Власовым, О.Г. Борисовым [1] и С.И.Набоко [8 - 10], - универсальным характером смены стадий постмагматической газогидротермальной деятельности (высокотемпературная галоидно-сернисто-углекислая → сернисто-углекислая → низкотемпературная углекислая) как отражение дифференцированного отделения флюидов от силикатного расплава. Летучие компоненты, одновременно покидающие вулcano-плутон в условиях субвулканической, приповерхностной и поверхностной фации глубинности, растворяются в поверхностных и подземных водах. Поскольку термодинамические условия отделения флюидов от силикатных расплавов эффузий и интрузий резко отличимы [8], то и синхронно возникающие магматогенные (глубинные) и вулканические (поверхностные) гидротермы также резко различаются по своим физико-химическим параметрам и преобразующим эффектам. По мнению С.И.Набоко [9, 10] и В.И. Кононова [5] эти растворы не эволюционируют одни в другие.

При одновременном взаимодействии поверхностных и глубинных гидротерм с вмещающими породами возникает сложно построенная метасоматическая зональность, обнаруживающая, наряду с вертикальным, также и черты горизонтального строения (**рис. 3**). Она, с учетом всего вышеизложенного, может быть представлена отдельными парами метасоматических зон (глубинных и поверхностных), каждая из которых обязана своим происхождением одному и тому же определенному набору летучих компонентов (см. рис. 1, 2, А-А₁, Б-Б₁, В-В₁, Г-Г₁, Д-Д₁). Наличие такой генетической парности (глубинных и поверхностных «половин» определяет их взаимозависимость или корреляцию, при которой одна отдельно взятая зона не может существовать без другой. Однако, реальные геологические условия нередко нарушают эту закономерность.

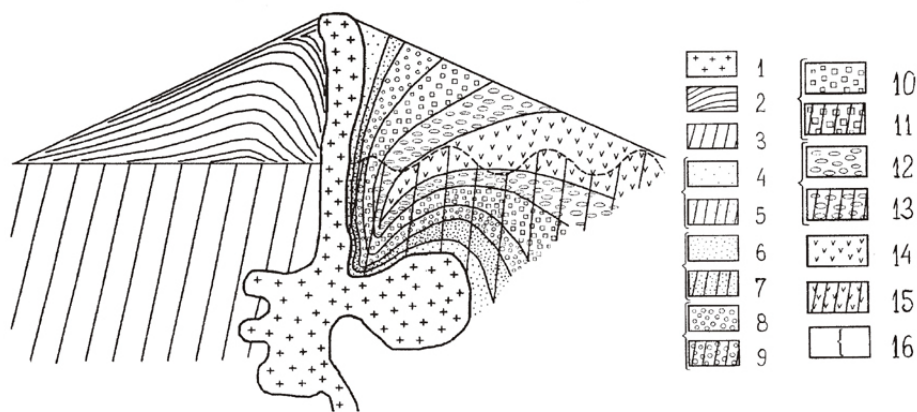


Рис. 3. Принципиальная схема метасоматической зональности вулкане-плутонических комплексов: 1— породы подводящего канала и близповерхностных интрузий; 2— стратифицированная толща центральной части вулкана; 3 — породы фундамента; 4—15 метасоматические зоны: 4-монокварцевая серных опалитов; 5 — монокварцевая грейзеноподобных вторичных кварцитов; 6 -алунит-опаловая; 7 — кварц-мусковитовая (кварц-серцитовая); 8 — каолинит-опаловая; 9 — эпидот-хлорит-серцитовая (среднетемпературных пропилитов); 10 — опал-каолинитовая; 11 — цеолитовых и трансильванских (низкотемпературных) пропилитов; 12 — каолинитовая; 13 — аргиллизированных пропилитов; 14 — смектитовая; 15 — цеолитовая гидротермальных аргиллизитов; 16 — взаимозависимые (корреляционные) зоны

3. Дейтероорогенные и тафрогенные области

Сопряженность гидротермальной активности с вулканическими процессами (поверхностным магмопроявлением) отмечается в дейтероорогенных и тафрогенных областях. Там основным тепловым источником гидротермальных систем становится энергетический эффект метасоматических процессов [15], а также тепло изливающихся расплавов и пирокластических толщ [7]. Термы целиком состоят из нагретых вадозных вод. Перечисленные обстоятельства обуславливают участие, главным образом, CO_2 в гидротермальной деятельности и низкие ($< 200^\circ C$) температуры минералообразования.

Дейтероорогенные области. Позднемезозойский дейтероорогенез в Забайкалье и на сопредельных территориях развивался в юрское и меловое время и сопровождался интенсивным вулканизмом, связанным с внутрикоровыми магматическими очагами. При этом в наложенных депрессиях появлялись многочисленные озёра, которые при последующих извержениях погребались вулканогенным витрокластическим материалом с образованием артезианских бассейнов. Экзотермические реакции гидратации, раскристаллизации и цеолитизации вулканического стекла вызывали прогрев водовмещающих пород артезианских бассейнов, свободную конвекцию подземных растворов и возникновение гидротермальных систем забайкальского типа [6]. В этих системах широкое распространение приобретали цеолитовые и смектитовые метасоматиты. Определяющая роль в цеолитообразовании принадлежит составу преобразующих пород. Кислая витрокластика замещается высококремнистыми цеолитами (морденит, клиноптилолит). В миндалекаменных субщелочных базальтах

развиваются богатые алюминием кальциевые, натриевые и кальциево-натриевые цеолиты (натролит, мезолит, стильбит и пр.). Гидротермалиты лишены вертикальной зональности, т.е. взаимозависимых метасоматических зон, но в продуктах изменения кислых гиалотуфов устанавливается горизонтальная метасоматическая зональность.

Таким образом, для гидротермальных систем, связанных с дейтероорогенным поверхностным магмопроявлением, характерна низкотемпературная углекислая стадия гидротермального процесса. В границах этой стадии наблюдались прогрессивный и регрессивный этапы жизни системы. При этом формируется цеолит-сметитовые (сметит-цеолитовые) региональные гидротермалиты, лишённые взаимозависимых метасоматических зон.

Тафрогенные области. Тафрогенез – это блоковое расчленение континентальной коры с образованием продольных грабенов и излиянием базальтов. Типичным представителем тафрогенных областей является Кушмурунский грабен Тургайского прогиба, где широко развита риолит-базальтовая осадочно-вулканогенная формация, выделенная в туринскую серию (P₂-T₁₋₂).

В Кушмурунском грабене возникновение гидротермальных систем связано с вторжением базальтовой магмы в водонасыщенные осадочные породы. Преобладающим (нередко единственным) газовым компонентом нагретых вод был CO₂. Широкомасштабный гидротермальный метасоматоз протекал в низкотемпературных условиях (150-80°C), соответствующих углекислой стадии минералообразования (см. рис. 2). Это способствовало региональной смектитизации базальтов и реже встречаемых риолитов и дацитов [6]. Характерно, что смектитизированные породы и смектитовые глины, принимаемые многими геологами за продукты коры выветривания, лишены как вертикальной, так и горизонтальной метасоматической зональности (взаимозависимых зон).

Таким образом, в рассмотренных структурных элементах земной коры последовательность обстановок формирования метасоматитов сопряжена с изменением условий образования гидротермальных систем, т.е. с различной природой нагретых растворов. Это, в первую очередь, связано со сменой вулканоплутонической деятельности вулканической. При этом гидротермальные системы, переживающие прогрессивный этап своей истории, выстраиваются в ряд с последовательно меняющимися стадиями минералообразования: высокотемпературной галоидно-сернисто-углекислой → сернисто-углекислой → низкотемпературной углекислой. В структурах земной коры, где гидротермальный

процесс контролируется вулcano-плутоническими явлениями (островные дуги, активные континентальные окраины) под действием галоидов и сернистых газов формируется вертикальная метасоматическая зональность с взаимозависимыми (корреляционными) метасоматическими зонами. В тех геологических обстановках, где гидротермальная активность обусловлена поверхностным магмопроявлением, а углекислый газ играл ведущую роль в минералообразовании, вертикальная зональность, определяемая наличием взаимозависимых зон, в метасоматитах отсутствует. Это относится к дейтероорогенным и тафрогенным областям.

Вторая задача заключалась в проведении сравнительного анализа состава и генезиса метасоматитов рассматриваемых структурных элементов земной коры. Изложенный материал свидетельствует о том, что общим для трёх тектономагматических зон является развитие в них гидротермальных аргиллизитов. Принципиальные отличия заключаются в том, что в островодужных районах аргиллизиты являются лишь фазией пропилитов или вторичных кварцитов, тогда как в областях дейтероорогенной и тафрогенной активизации аргиллизиты образуют самостоятельную формацию.

4. Заключение

В результате сопоставления общей вертикальной метасоматической зональности островодужных, орогенных, дейтероорогенных и тафрогенных областей [6] выявляется чёткая закономерность, которая заключается в следующем (рис. 4):

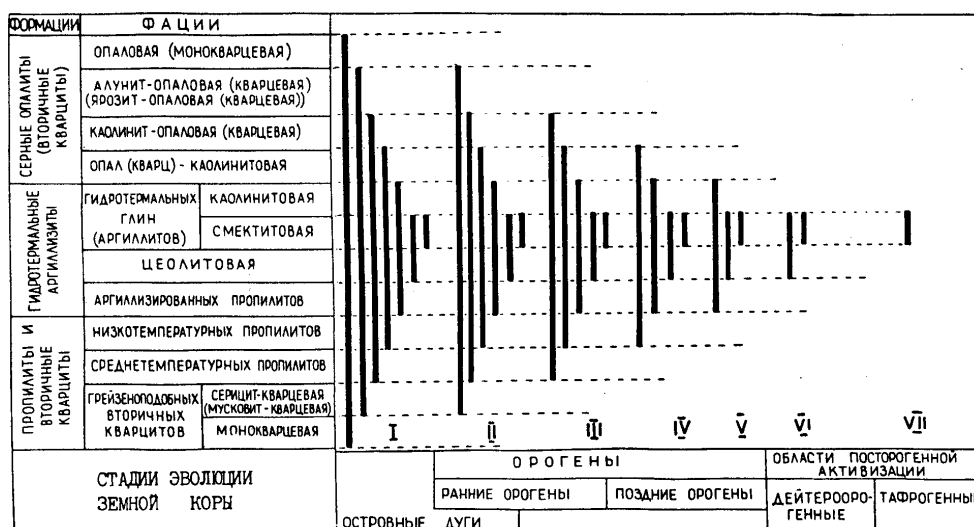


Рис. 4. Гомологические ряды вертикальной зональности гидротермалитов на определенных этапах развития континентальной земной коры.

1) переход от одного члена рассматриваемого ряда к другому происходит с выпадением самых крайних взаимозависимых зон метасоматической колонны;

2) сопровождается это изменением формационно-фациальных взаимоотношений гидротермалитов как отражение универсального характера смены состава магматических эманаций и понижения температуры растворов;

3) при этом отдельно взятые зоны общей метасоматической колонны образуют единую систему, в которой невозможно изолированное перерождение конкретных зон. Данное обстоятельство лежит в основе принципа корреляции метасоматических зон [6].

В соответствии с перечисленными закономерностями, а также теоретическими соображениями Ю.А. Жданова и А.И. Уёмова [3], изображённый на рис. 4 ряд общей вертикальной метасоматической зональности именуется гомологическим рядом гидротермальных метасоматитов. Гомологическим рядом гидротермальных метасоматитов в областях наземного вулканизма следует называть группы гидротермально изменённых пород, соседние члены которых образовались в близких тектономагматических обстановках, но отличающихся друг от друга крайними взаимозависимыми зонами вертикальной метасоматической колонны.

Симметрия есть частный случай гомологии, при котором обязательно равенство соответствующих элементов фигур [2], в нашем случае – взаимозависимых (корреляционных) метасоматических зон, слагающих единую вертикальную метасоматическую колонну. Сметтит-цеолитовый (цеолит-сметтитовый) тип региональных метасоматитов является осью симметрии установленных гомологических рядов, к которой стремятся продукты вторичного изменения в необратимом процессе становления континентальной земной коры. В своём крайнем выражении гидротермалиты (сметтитовый тип региональных метасоматитов) азональны и представляют своеобразный «базис» гидротермальной активности. Связано это с тем, что сметтиты являются той финальной кристаллической фазой, которой в регрессивном гидротермальном процессе заканчивается история развития целой серии породообразующих минералов.

Если метасоматиты расположить в геологических структурах, отвечающих определённым этапам становления континентальной коры, можно представить эволюцию гидротермального литогенеза в процессе развития Земли. Однако и в пределах каждого отдельно взятого этапа становления коры, учитывая регрессивную направленность гидротермальной активности во времени, процесс нарастающей

аргиллизации может иметь самостоятельное развитие. При этом он заканчивается углекислой фазой, но на прогрессивном этапе развития достигает лишь характерной экстремальной для данных геологических условий гидротермальной стадии.

Таким образом, специфику гидротермального литогенеза в конкретной геодинамической обстановке в полной мере можно оценить при выяснении соотношения plutonic и вулканических явлений, контролирующих постмагматический процесс. Такой подход способствует более успешному выяснению причин закономерного изменения метасоматических тел по вертикали (а в ряде случаев и по латерали), что является важнейшим элементом в создании генерализованных моделей формирования метасоматитов различных генетических типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Власов Г.М., Борисов О.Г.** дифференциация магматических эманаций и значение кислотных изменений пород при поисках руд // Записки ВМО. 1969. Ч. 98. Вып. 5. С. 517-529.
2. Гомология // Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра. 1978. С. 180.
3. **Жданов Ю.А., Уёмов А.И.** Гомология // Философская энциклопедия. Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1960. С. 387.
4. **Кирюхин А.В., Сугробов В.М.** Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки. – М.: Наука. 1987. 152 с.
5. **Кононов В.И.** Геохимия термальных вод областей современного вулканизма // Труды ГИН АН СССР. 1983. Вып. 379. 216 с.
6. **Коробов А.Д.** Гидротермальный литогенез в областях наземного вулканизма Автореф. дис... докт. геол.-мин. наук. – М.: ГИН РАН. 1995. 44 с.
7. **Масайтис В.Л.** Пермский и триасовый вулканизм Сибири: проблемы динамических реконструкций // Записки ВМО. 1983. Ч. 112. Вып. 4. С. 412-425.
8. **Набоко С.И.** Эволюция гидротермальных систем и их металлоносность // Эволюция вулканизма в истории Земли. М.: Наука. 1974. С. 391-400.
9. **Набоко С.И.** Химические типы вулканических вод // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука. 1974. С. 8-14.
10. **Набоко С.И.** Металлоносность современных гидротерм в областях тектономагматической активности. М.: Наука. 1980. 200 с.
11. **Наковник Н.И.** Вторичные кварциты СССР. – М.: Недра. 1968. 336 с.
12. **Рычагов С.Н., Гончаренко О.П., Главатских С.Ф. и др.** Температурная и минералогическая характеристика геотермального месторождения Океанское // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35. № 5. С. 405-418.
13. Структура гидротермальной системы / Рычагов С.Н., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д. и др. – М.: Наука. 1993. 298 с.
14. **Устиев Е.К.** Проблемы вулкано-плутонизма. Вулкано-плутонические формации // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1963. № 12. С. 3-30.
15. **Эллис А.Дж.** Химия некоторых исследований геотермальных систем // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир. 1970. С. 389-427.