

Условия формирования расплавов в архее

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Розглянуто різницю перебігу глибинних процесів в археї та фанерозої, яка проявлена у відсутності ініціального плавлення, тривалості процесу активізації, площі її прояву, складі активних компонентів у розплавах астеносфери архею.

Установление условий образования каждой из последовательно залегающих в стратиграфическом разрезе пород возвращает нас к формационному анализу, широко применявшемуся в 1960–80-е годы, и практически не используемому в настоящее время. Использование методических приемов формационного анализа для применения к докембрийским процессам натолкнулось на ряд трудностей. Как правило, под понятием “формация” рассматривались устойчивые породные комплексы, характерные для определенных этапов “геосинклинального”, “платформенного”, “рифтового” процесса. Нельзя не согласиться с мнением Е. М. Лазько [1], что невозможно параллелизовать архейские образования с известными геосинклинальными формациями фанерозоя ввиду отсутствия в архее понятий “геосинклиналь” и “платформа”.

При использовании формационного анализа главное внимание уделялось условиям осадконакопления, палеоклимату и тектонике. Вопрос об источнике магматических расплавов особенно основных и ультраосновных не поднимался вовсе, несмотря на то, что вулканогенные спилиты и коматииты широко представлены в разрезах всех зеленокаменных структур (ЗКС) мира. Развитие геологической науки за последние 30 лет показало, что приповерхностные события инициированы процессом, протекающим в верхней мантии, а задачей формационного анализа является восстановление не только геологических событий на поверхности, но и глубинного процесса.

Современная петрология позволяет устанавливать *PT*-условия дифференциации расплавов в диапазоне глубин от 20 до 250 км. Использование данных о составе магматических пород для восстановления глубинного процесса базируется на очевидных утверждениях:

1. Магматические расплавы образуются в астеносфере (слое плавления).
2. Их состав зависит от *PT*-условий сегрегации и дифференциации расплава — глубины размещения кровли астеносферы.
3. Магматические породы, залегающие на поверхности, образованы из глубинных расплавов. Поэтому они являются индикаторами глубинного процесса.

Таким образом, можно определить размещение кровли астеносферы *на момент отделения расплава* по составу магматической породы.

Процедура. Устанавливается глубина размещения кровли астеносферы, затем последовательность ее изменения. Следовательно, можно определить размещение кровли астеносферы на каждом этапе и изменение ее расположения в процессе активизации в целом. Методические приемы описаны в публикации [2].

Подобная процедура позволяет установить протекание процесса в большинстве фанерозойских структур. Главное условие — наличие описаний магматических пород, имеющих

привязку к месту в стратиграфическом разрезе (абсолютный или относительный возраст). Однако для докембрийских образований ее применение наталкивается на ряд трудностей. Магматические породы, залегающие на современной поверхности, характеризуют условия не только образования первичной породы, но и ее преобразования. Интенсивно преобразованные породы гранулитовой и высокой амфиболитовой фации, в данное время находящиеся на поверхности, на момент последнего преобразования размещались на глубине не менее 20 км, в непосредственной близости от корового очага расплавов.

Состав магматической породы характеризует условия дифференциации расплава. В процессе активизации на более ранние породы отлагаются более поздние. Их магматическая составляющая может формироваться на разных глубинах в мантии. Нами по комплексу признаков введены “реперные” глубины, км: 200, 150; 100 и 50 [2]. Последовательность изменения расположения кровли астеносферы может быть различной. При размещении кровли астеносферы под корой во всех случаях через некоторое время (~5 млн лет) формируется коровый очаг плавления на ~20 км вследствие внедрения мантийных расплавов и кондуктивного прогрева. Температура внедряющегося расплава, по составу соответствующего базальту, составляет ~1200 °С, тоналиту — ~1100 °С. Тепло рассеивается на плавление пород коры, вынесение горячего вещества (водно-силикатного гранитизирующего флюида) к поверхности и преобразование вышележащих пород. Через некоторое время в коровой астеносфере установится $T \sim 600$ °С, отвечающая температуре плавления пород амфиболитовой фации на этой глубине.

PT-условия метаморфизма докембрийских пород отвечают глубинам 10–30 км. Очевидно, что на глубине ~20 км “температуры близки к температурам кристаллизации магматических масс и широко развивается всеобщая полевошпатизация пород” [3, с. 139]. На этих глубинах происходит плавление, близосolidусные реакции обмена между первичной породой и расплавами-флюидами, отделяющимися с кровли коровой астеносферы. Высокотемпературные преобразования с участием агрессивных метасоматизирующих флюидов нивелируют грань между региональным и плутонометаморфизмом. В роли “плутон” выступает коровая астеносфера. Подобное преобразование может частично или полностью “стереть” первоначальные геохимические метки (проявленные как в изменении состава минералов, так и возрастные). Собственно, сохраняются лишь породы, температура плавления которых намного превышает температуру solidуса пород амфиболитовой фации.

В регионах, где развиты породы высокой амфиболитовой и гранулитовой фаций (например, Хащевато-Завальевская структура Побужья и Голованевская шовная зона) на относительно небольшой площади совмещены породы, образованные и преобразованные в процессе нескольких активизаций (3,6; 3,0; 2,8; 2,6 млрд лет назад). Самые интенсивные преобразования наложены в процессе последней (2,0 млрд лет назад), после чего породы выведены на современную поверхность. В этом случае восстановление глубинного развития необходимо начинать с восстановления стратиграфического разреза. Причем для этого требуется создание принципиально новых методических приемов.

Однако восстановление первичного состава пород, а затем и условий образования расплавов, через “снятие метаморфизма” и сравнение с фанерозойскими комплексами, предложенная Н. П. Семененко и И. Н. Бордуновым [4], может применяться для пород зеленосланцевой и низкой амфиболитовой фаций. Ее успешное использование для расшифровки глубинного развития ЗКС Среднеприднепровского блока (СПБ) обусловлено широким развитием в них вулканогенных пород. Подобная процедура была проделана и описана в публикации [2].

Для всех ЗКС СПБ были установлены глубины образования мантийных расплавов каждой магматической породы, их изменение в каждой ЗКС. Сопоставление разрезов разных ЗКС (Верховцевской, Сурской, Чертомлыкско-Соленовской и Конкско-Белозерской) показало единство глубинного развития СПБ в архее. На юг от Девладовского разлома шире представлены породы основного состава, ультрабазиты занимают незначительное место в стратиграфическом разрезе по сравнению с Сурской и Верховцевской структурами. Но все комплексы пород, образованные из расплавов, дифференцированных при одинаковых P - T -условиях, имеют аналоги в остальных ЗКС и залегают в одинаковой последовательности. Довольно уверенно параллелизуются криворожская и белозерская серии.

В результате можно сформулировать отличия в протекании глубинных процессов архея и фанерозоя.

Отсутствует инициальное плавление, обязательное для фанерозоя. Если в фанерозое появление астеносферы возможно на глубине более 200 км, а развитие процесса приводит к перемещению вверх астенолитов (плюмов, термиков), то в архее астеносфера существует изначально. Направление развития процесса, его эволюция заключается в конечном увеличении мощности литосферы, вынесении к поверхности избытка тепловой энергии и вещества, не разрешающего кристаллизацию в границах мантии. Вследствие присутствия воды и избытка базальтоидной компоненты — состав расплава астеносферы резко отличается по составу (свойствам) от состава недеплетированной лерцолитовой мантии (преимущественно сложенной оливином, пироксенами). Соответственно температура в астеносфере превышает температуру солидуса для этого состава.

Абсолютный возраст пород ЗКС СПБ 3,37(?)–3,0 млрд лет (первый ярус) и 3,0–2,8 млрд лет (второй ярус). Активизация, протекавшая в это время, состоит как минимум из 16 этапов, т. е. включает не менее 16 фаций для ЗКС СПБ. Образование формации, соответствующей первому ярусу, по [4], — 9 фаций, образованных на 9 этапах, завершается образованием полифазных интрузий сурского, палингенных гранитоидов днепропетровского и саксаганского комплексов. Ранние недифференцированные члены комагматичной серии представлены коматиитами — породами, расплавы которых вынесены с глубин не менее 200–250 км. Можно предположить адвективное (или конвективное) течение вещества в рамках астеносферы, охватывающей диапазон глубин современной верхней мантии. После перемещения частично расплавленного вещества на глубину ~ 50 км происходит резкое повышение степени плавления вследствие снятия давления, дальнейшая дифференциация расплава, внедрение расплавов тоналит-трондьемитового состава в кору (на глубину около 20 км) и прогрев верхней части коры — повышение палеогеотермического градиента. Слой плавления в коре существует в течение длительного времени (очень приблизительно от 3,1 до 3,0 млрд лет) вследствие постоянного (по крайней мере, четырехкратного) пополнения подкоровой астеносферы глубинными расплавами. Т. е. в течение длительного времени региональный палеогеотермический градиент поддерживается постоянно высоким (35 °С/км), а подкоровая и коровая астеносферы служат источником не только тепла, но и вещества для интрузий и гидротерм. Высокое содержание активных компонентов (в первую очередь Na и Cl) в водном флюиде приводит к его существенному обогащению (вследствие экстракции из расплава астеносферы при $P \sim 0,6$ ГПа) кремнием и алюминием — стирается грань между силикатным расплавом и водным флюидом, гранитизация приобретает площадной характер.

Формация, соответствующая второму ярусу, по [4], состоит из семи этапов. На четвертом и шестом — кровля астеносферы располагается под корой. Коровые дифференциаты

представлены гранитами, возраст которых $\sim 2,8$ млрд лет, — демуриные, мокромосковские и, возможно (частично), токовские. Они отличаются более низкими температурами образования, присутствием микроклина — хлоридно-натриевые растворы сменяются хлоридно-калиевыми.

Активизация протекает на огромной территории. “Вычленение” СПБ в самостоятельную структуру происходит позднее при заложении (вероятно, 2,8–2,6 млрд лет назад) Криворожско-Кременчугской шовной зоны и формировании Криворожско-Кременчугской и Орехово-Павлоградской шовных зон (2,1–1,75 млрд лет назад).

PT-условия дифференциации мантийных расплавов такие же, как и в фанерозое, но состав подвижных компонентов иной. Формирование расплавов, из которых образованы магматические и эксгальционные породы на поверхности, происходит в условиях избытка базальтоидной составляющей, в присутствии воды, щелочей и галогенов. Флюиды, отделяющиеся с кровли астеносферы по содержанию SiO_2 , Al_2O_3 и CO_2 , являются разбавленными эквивалентами силикатных и карбонатных расплавов. Многие магматические и эксгальционские породы архея не имеют фанерозойских аналогов. Только в архее (на границе архея и протерозоя) образуются высокомагнезиальные коматииты, железистые кварциты и железисто-магнезиальные карбонаты. Это объясняется высоким окислительным потенциалом расплавов астеносферы, иными словами, присутствием воды (на больших глубинах — кислорода), что приводит к активности магния и железа в силикатных и карбонатных жидкостях, формированию основных плагиоклазов, пассивности щелочей и галогенов при дифференциации.

Мощность коры, по всей видимости, соответствует фанерозойской. Она определяется давлением 1,5 ГПа, разрешающим появление плагиоклаза в составе ликвидусной композиции, что снижает температуру кристаллизации расплава. Кора имеет более основной состав, чем в фанерозое. От 3,1 к 2,8 млрд лет назад происходит изменение состава расплавов, формирующихся в коре. Кальций-натриевые плагиограниты сменяются калиевыми микроклиновыми. Именно в это время (3,1–2,8 млрд лет назад) начинается гранитизация (раскисление) коры вследствие длительного существования в ней слоя плавления. Метасоматоз и плавление проходит с участием водно-силикатных (в архее) и щелочных (в протерозое) флюидов-расплавов, выносимых из мантии. Это определяет их активность как растворителей и транспортировщиков петрогенных (в первую очередь, кремния и алюминия) элементов в виде комплексных соединений. Они перемещаются в коровую астеносферу и к поверхности. Происходит “гранитизация” коры и образование гидро- и атмосферы. Состав последних существенно отличается от современного.

Таким образом, отмеченная И. Н. Бордуновым зависимость состава железистых пород от места в разрезе (и соответственно в процессе) объясняется их эксгальционной природой. Фиксируется четкая корреляция химического состава железистых пластов с составом синхронных вулканогенных. *PT*-условия и активность подвижных компонентов при формировании расплава, из которого образована вулканогенная порода, и флюида-расплава, из которого образована железистая, отлагающаяся синхронно, объясняются физико-химическими процессами на кровле астеносферы [2]. Происходит распределение катионов между расплавом и карбонатной, кремнекислой фазами, их разделение, последовательное отделение с кровли астеносферы и вынесение к поверхности в виде эксгальций и магматических расплавов. Силикатный расплав и кремнекислый флюид отличаются пропорцией $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$, а распределение Mg и Fe одинаково (близко) в силикатной и карбонатной фазе. Изменение состава железистых и вулканогенных пород, происходит закономерно и объ-

сняется изменением глубины очага дифференциации — давления в глубинной астеносфере, являющейся источником вещества. Способ образования железистых пластов — осаждение из раствора на дне морского бассейна. И в этом смысле они есть осадочными породами.

1. Лазько Е. М. Формационный анализ и его роль в изучении высокометаморфизованных толщ раннего докембрия // Проблемы геологии докембрия. — Киев: Наук. думка, 1971. — С. 32–43.
2. Усенко О. В. Глубинные процессы образования расплавов в тектоносфере: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук / НАН Украины. Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, 2008. — 41 с.
3. Семененко Н. П. Метаморфизм подвижных зон. — Киев: Наук. думка, 1966. — 300 с.
4. Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита / Под. ред. Н. П. Семененко. — Киев: Наук. думка, 1979. — 412 с.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 29.07.2010

O. V. Usenko

Conditions of the formation of melts in Archean

The difference of the courses of deep processes in Archean and Phanerozoic is considered. It is revealed in the absence of melting, duration of the activation, area of its manifestation, and composition of active components in melts of the Archean asthenosphere.