

Эволюция мантийных расплавов и флюидов в докембрии

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

На примере магматических комплексов Украинского щита показано, что в архее-палеопротерозое состав глубинных мантийных флюидов изменялся закономерно. Окисленные и кислые флюиды, характерные для архея, в палеопротерозое сменились нейтральными водными хлоридно-калиевыми, а после 2,0 млрд лет — щелочными карбонатными фторидно-натриевыми. Это определило эволюцию магматических пород докембрия.

Ключевые слова: архей, палеопротерозой, мантийные флюиды, эволюция.

Отражением эволюции Земли является изменение состава магматических и хемогенно-осадочных комплексов, а также связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Развитие Земли, как любой сложной термодинамической системы, является направленным. Направление — диссипация внутренней энергии и перераспределение вещества. Внутренняя энергия растрачивается на остывание через поверхность кондуктивным путем и в большей степени — в процессе конвективного перераспределения вещества недр. Последний процесс имеет еще один результат — распределение химических элементов по вертикали. В процессе эволюционного развития осуществляется формирование стратифицированных оболочек, минеральный и химический составы которых зависят от *PT*-условий существования.

Самые древние вулканогенные породы Украинского щита (УЩ) образовались около 3,65 млрд лет назад. Наличие вулканогенных пород позволяет восстановить протекание глубинного процесса. Состав расплавов определяется двумя факторами [1]:

протеканием геодинамического процесса — глубиной расположения границы литосферы — астеносфера (ЛАГ), определяющей *PT*-условия дифференциации расплава;

физико-химическими взаимодействиями в расплаве, которые, в свою очередь, обусловлены составом флюида, сопровождающего дифференциацию в данных *PT*-условиях.

В публикации [2] показано, что глубины расположения ЛАГ в докембрии можно считать аналогичными протерозойским, так как они определяются той же причиной — изменением поведения вещества при изменении давления. Рассмотрение ограничено нижней границей формирования расплавов, достигающих поверхности Земли — 200–250 км.

При формировании зеленокаменных структур Среднеприднепровского мегаблока (СПМБ) мощность литосферы могла изменяться во времени от 50 до 250 км и определялась протеканием глубинного процесса [2]. При вынесении “горячего” вещества снизу происходили прогрев и плавление литосферы — уменьшение мощности.

В архее формирование мантии только начинается, поскольку при давлении более 1,5 ГПа может кристаллизоваться состав, незначительно отличающийся от состава перидотита. При более высоких давлениях устойчивы оливин, пироксен, шпинель и гранат. Содержание петрогенных окислов должно приблизительно соответствовать: MgO ~40%, SiO₂ ~44%, FeO ~8%.

На долю Al_2O_3 и CaO приходится $\sim 3\%$. Амфиболы, слюды, клинопироксены, а также другие минералы, обогащенные глиноземом, железом, кальцием, щелочами, приближающими состав мантии к составу пиролита (более глиноземистого и кальциевого), могут присутствовать в незначительных количествах. Поэтому для кристаллизации мантии на глубинах до 50–250 км избыток кремнезема, глинозема, а также окисленного флюида (кислорода в виде H_2O и CO_2) должен быть удален из расплава. Углерод в виде графита и алмаза может входить в состав недеплетированных участков мантии — верлитов, эклогитов, ильменитовых гипербазитов. Однако его доля, как и количество глиноземистых и железистых пород, не может быть значительной. Железо в составе мантии должно быть прочно связано в составе силикатов и шпинелей, а его количество в составе отдельных минералов и мантии в целом — уменьшаться с увеличением давления. Повышенные содержания сульфидов, окислов и графита приведут к резкому снижению температуры плавления, что имеет следствием неустойчивость формирующейся мантии: для ее плавления достаточно незначительного повышения температуры. Возможно, обогащение легкоплавкой компонентой литосферной мантии также являлось причиной длительности архейской активизации (от $\sim 3,4$ до 2,8 млрд лет). То есть, формирование кристаллической мантии в поле градиента давления включает не только падение температуры до температуры солидуса перидотита с незначительным количеством примесных фаз (пиролита), но и удаление компонентов, избыточных для перидотита. Этот процесс и прослеживается в изменении состава пород архея-палеопротерозоя.

До 2,8 млрд лет базальтоидная составляющая (SiO_2 , Al_2O_3 и CaO) выносилась из мантии на поверхность расплавами. Флюиды, их сопровождавшие, были водно-хлоридными окисленными. Вследствие этого были обогащены железом, а также содержали кремнезем и глинозем. Главный тренд дифференциации расплавов в архее — избавление глубинных оболочек от кислорода. Он выносился с расплавами в виде растворенного в них водного (кислого с хлором) и карбонатного флюидов. Обстановка формирования расплавов, сопутствующих эксгаляционных пород (в том числе железистых) была окислительной. Углеродороды не образовывались.

На этапах, когда дифференциация расплавов протекала под корой, оливин и пироксены кристаллизовались в мантии, а полученный в результате базальтовый расплав проникал в кору [3]. Под действием тепла глубинной астеносферы и внедренных расплавов происходило плавление нижней части коры. Оно сопровождалось растворением пород коры под действием кислых водных флюидов, которые поступали из мантии с расплавом. Кремнезем, глинозем, железо, натрий экстрагировались из расплава и пород коры, концентрировались во флюиде, что приводило к приближению его состава к гранитоидному расплаву. В нижней части коры также осуществлялась кристаллизационная дифференциация. В *PT*-условиях коры кристаллизатом служили амфибол, плагиоклаз, биотит. Происходила гранитизация (раскисление) корового интервала глубин. Гранитизация повторялась многократно: 3,17 млрд лет, 3,11–3,05, 3,0–2,95, 2,85–2,8 млрд лет назад. Около 2,8 млрд лет назад формировались первые разломные зоны, наблюдаемые на современном уровне эрозионного среза.

Таким образом, результат архейских событий — кристаллизация пиролитовой (перидотитовой, но содержащей эклогиты и ильменитовые гипербазиты) мантии, а также формирование коры гранит-андезитового состава. Этот факт подтверждается возрастом ксенолитов, выносимых кимберлитовыми расплавами на кратонах. Возраст ксенолитов эклогитов трубки Роберте Виктор ($2,7 \pm 0,1$) млрд лет, Удачной — ($2,9 \pm 0,4$) [4]. Включения сульфидов

в алмазах из эклогитов трубок Корифонтейн, Кимберли и Орапа также имеют архейский возраст ~ 3 млрд лет [5].

Следующая глобальная активизация началась на границе неoarхея–палеопротерозоя: не ранее 2,65 и не позже 2,5 млрд лет назад.

Изменение мощности литосферы происходило в последовательности, сходной с архейской [6]. Территория разделилась на блоки, разграниченные шовными зонами (ШЗ). Изменилась площадь, на которой мощность литосферы одинакова в одно время, а также состав вещества, выносимого на блоках и в ШЗ. Большая часть СПМБ не участвовала в процессе. В ШЗ происходило вынесение окисленного и кислого флюида, обогащенного железом и формировались железистые пласты значительной мощности, тогда как на блоках выносились преимущественно базальтоидная составляющая — происходило накопление вулканогенно-осадочной толщи, не включающей железистую формацию. Если в архее поступление глубинного вещества было связано с конвективными течениями, то при формировании ШЗ щит разделялся на блоки, наличие которых связано со структурами, расположенными глубже 200–250 км. Разломы, ограничивающие шовные зоны, образованы 2,45 млрд лет назад. По всей видимости, они являлись поверхностными проекциями глубинных структурных неоднородностей, по которым происходило вынесение вещества с глубин более 250 км к поверхности. Возможно, под ШЗ происходило вынесение вещества из еще более глубинных слоев мантии.

В составе криворожской серии преобладают эксгаляционно-осадочные породы, в том числе железистой формации, что является отражением изменения состава флюида, сопровождающего дифференциацию на кровле астеносферы [1]. В Криворожско-Кременчугской ШЗ появляются не только сине-краснополосчатые джеспилиты, почти полностью состоящие из окислов железа и кремнезема, но и графитсодержащие прослои. Сокращается доля магнезиальных пород: коматииты не образуются, магнезиальные карбонаты представлены брейнеритом, но появляется и доломит. Железистые породы (джеспилиты) содержат магнетит и гематит. Комплекс признаков свидетельствует о сокращении доли воды при сохранении роли хлора. Наличие графита указывает на протекание окислительно-восстановительных реакций и проявление несмесимости на кровле астеносферы. Это возможно только при снижении окислительного потенциала и повышении щелочности на отдельных этапах геодинамического процесса (при дифференциации расплавов на 100 км).

Дальнейшая эволюция состава глубинного флюида отражена в составе массивов, сложенных габбро-монцонитами, сиенитами и гранитоидами (Новоураинского, Хлебодаровского и др.), образовавшимися накануне и в процессе палеопротерозойской гранитизации [7]. Их появление связано с зонами пересечения внутриблоковых меридиональных и субширотных разломных зон. Интрузивные граниты плавно переходят в палингенные. К началу формирования массивов мантийные расплавы были обогащены слабощелочными хлоридно-калиевыми флюидами. Влияние флюидов наиболее сказывается в расплавах, дифференцированных в подкоровом очаге — габбро-монцонитах, сиенитах. При дифференциации расплава были активны калий и титан, пассивные в архее. Железо в двухвалентной форме входило в состав пироксенов, оливина, что указывает на присутствие воды, нейтрализацию хлора калием и соответственно относительно невысокую щелочность. Вследствие присутствия воды (хотя ее количество несопоставимо с архейским), среда была слабокислая-нейтральная в ШЗ. В зонах внутриблоковых глубинных разломов (шов Херсон-Смоленск) — слабощелочная-нейтральная. По зонам глубинных разломов осуществлялась разгрузка водного хлоридно-калиевого флюида, что приводило к распространению корового очага плав-

ления на площадь всего щита (кроме СПМБ ?) — глобальной гранитизации. В отличие от архейской она протекала в один этап (2,05–2,02 млрд лет назад), но также фиксируется на всех щитах мира.

В процессе палеопротерозойской гранитизации тоналит-трондьемитовая кора была полностью переработана. Только самый верхний (до 15 км) слой сохранил архейский структурный рисунок (на УЩ–СПМБ и северная часть западного Приазовья). Там, где проходила палеопротерозойская активизация, он практически полностью уничтожен эрозией — на большую часть поверхности выходят палингенные микроклиновые граниты, в протерозое размещавшиеся на глубине около 20 км. Их состав в пределах УЩ изменяется незначительно. В процессе палеопротерозойской активизации осуществлялись вертикальные и горизонтальные перемещения поверхности значительной амплитуды.

После гранитизации (~2,0 млрд лет назад) состав глубинного флюида изменился полностью. Вода во флюиде, поступавшем из мантии, отсутствовала. В мантийных очагах дифференциации происходят окислительно-восстановительные взаимодействия. Следствие участия ультращелочных карбонатных фторидно-натриевых флюидов — появление карбонатитовых расплавов и графита [1]. Одно из самых ярких проявлений — Черниговский комплекс карбонатитов Приазовского мегаблока. При давлениях $>1,5$ и $<4,5$ ГПа карбонатный флюид и силикатный расплав в щелочной среде несмесимы. В карбонатитах концентрировались кальций и железо (массовое содержание СаО в севидах 40%, окислов железа — 5–10%). Катионы распределялись между фазами неравномерно. Карбонатный расплав был обогащен СаО и FeO. В силикатном расплаве наблюдался их дефицит. В нем концентрировались натрий и глинозем. На поверхности формировались нефелиновые сиениты, а в восточной части Приазовского мегаблока — породы Октябрьского массива, окруженные мариуполитами. Магматические породы содержат углеводороды, образующиеся в процессе глубинной дифференциации расплава. На заключительных этапах активизации ЛАГ располагалась на глубине 100 км.

В это же (или близкое) время образовались массивы анортозитов-гранитов рапакиви (Коростенский и Корсунь-Новомиргородский). Особенности строения и протекания активизации в западной и центральной частях УЩ после 2,0 млрд лет назад обусловили иные породные комплексы при том же составе глубинного флюида. В отличие от Приазовского мегаблока, расплавы формировались под корой. В трансрегиональной разломной зоне Херсон–Смоленск на границе кора — мантия и в коре очаг плавления, существовавший при гранитизации, сохранился. Поэтому щелочные флюиды, поступавшие из глубинных оболочек, смешивались с остаточными расплавами и водными хлоридно-калиевыми флюидами, что обусловило особенности состава массивов анортозитов — гранитов рапакиви, а также появление синхронных литий-фтористых гранитов и редкометалльных пегматитов. Появление месторождений урана, синхронных формированию Корсунь-Новомиргородского плутона, связано с активностью глубинных щелочных флюидов и их нейтрализацией у поверхности. Уран накапливается в карбонатно-натриевых растворах и в расплаве существует в шестивалентной форме в составе карбонатных комплексов. Однако для образования оксидов урана необходимо его восстановление до четырехвалентного. Это возможно при понижении щелочности и в более окисленной среде, что и происходило в коре при смешении поступавших щелочных карбонатно-натриевых и сохранившихся водно-хлоридно-калиевых флюидов и расплавов.

Во время формирования массивов габбро-анортозитов и щелочных пород вынесение вещества (магматических расплавов, а затем гидротермальных растворов) происходило мно-

гократно с незначительными интервалами. Это связано с активностью разломных зон (Немировской, Херсон–Смоленской, Грузско–Еланчикской) значительной глубины. Вертикальные и горизонтальные движения поверхности 2,0–1,75 млрд лет назад также имели максимальную амплитуду за рассматриваемый период. В это время было сформировано разломно-блоковое строение платформы, которое только активизировалось в более поздних геодинамических процессах.

Таким образом, в архее-палеопротерозое происходило формирование стратифицированных оболочек — коры и верхней мантии Земли, состав которых постепенно приближался к современному. Перераспределение вещества осуществлялось в процессе длительных активизаций и сопровождалось изменением количества и состава расплавов и флюидов, выносимых из глубинных геосфер. Окисленные и кислые флюиды, характерные для архея, в палеопротерозое сменились нейтральными водными хлоридно-калиевыми, а после 2,0 млрд лет — щелочными карбонатными фторидно-натриевыми. Это определило эволюцию магматических пород докембрия.

Цитированная литература

1. *Усенко О. В.* Формирование расплавов: геодинамический процесс и физико-химические взаимодействия — Киев: Наук. думка, 2014. — 240 с.
2. *Усенко О. В.* Условия формирования зеленокаменных структур Приднепровского блока Украинского щита // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 6. — С. 74–93.
3. *Усенко О. В.* Условия формирования гранитоидов Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области // Геофиз. журн. — 2014. — **36**, № 2. — С. 57–74.
4. *Pearson D. J., Canil D., Shirey S. B.* Mantle samples included in volcanics rocks: Xenoliths and diamonds. — The Mantle and Core / Ed. by R. W. Carlson. — Oxford: Elsevier, 2005. — P. 171–276.
5. *Shirey S. B., Carlson R. W., Richardson S. N., Menzies A., Gurney J. J., Pearson D. G., Harris J. B., Wiechert U.* Archean emplacement of eclogitic components into lithospheric mantle during formation of the Kaapvaal craton // Geophys. Res. Lett. — 2001. — **28**. — P. 2509–2512.
6. *Усенко О. В.* Этапы развития Криворожско-Кременчугской зоны // Доп. НАН України. — 2006. — № 4. — С. 127–132.
7. *Усенко О. В.* Глубинное развитие Ингульского блока Украинского щита в период формирования Новоукраинского и Корсунь-Новомиргородского плутонов // Геофиз. журн. — 2013. — **35**, № 3. — С. 54–69.

References

1. *Usenko O. V.* The formation of melt: geodynamical process and physico-chemical reactions, Kiev: Naukova Dumka, 2014 (in Russian).
2. *Usenko O. V.* Geophys. J., 2006, **28**, No 2: 74–93 (in Russian).
3. *Usenko O. V.* Geophys. J., 2014, **36**, No 6: 57–74 (in Russian).
4. *Pearson D. J., Canil D., Shirey S. B.* Mantle samples included in volcanics rocks: Xenoliths and diamonds, The Mantle and Core. Ed. by R. W. Carlson. Oxford: ELSEVIER Ltd, 2005: 171–276.
5. *Shirey S. B., Carlson R. W., Richardson S. N., Menzies A., Gurney J. J., Pearson D. G., Harris J. B., Wiechert U.* Geophys. Res. Lett., 2001, **28**: 2509–2512.
6. *Usenko O. V.* Dopov. NAN Ukraine, 2006, No 4: 127–132 (in Russian).
7. *Usenko O. V.* Geophys. J., 2013, **35**, No 3: 54–69 (in Russian).

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

Поступило в редакцию 09.02.2015

О. В. Усенко

Еволюція мантійних розплавів і флюїдів у докембрії

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ

На прикладі магматичних комплексів Українського щита показано, що в архей-палеопротерозої склад глибинних мантійних флюїдів змінювався закономірно. Окиснені та кислі флюїди, що притаманні архею, в палеопротерозої змінилися нейтральними водними хлоридно-калієвими, а після 2,0 млрд років — лужними карбонатними фторидно-натровими. Це визначило еволюцію магматичних порід докембрія.

Ключові слова: архей, палеопротерозої, мантійні флюїди, еволюція.

O. V. Usenko

Evolution of mantle melts and fluids at the Precambrian

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

On the example of magmatic complexes of the Ukrainian Shield, it is shown that the composition of the Archean-Paleoproterozoic deep mantle fluids changed regularly. Oxidized and acidic fluids, specific to the Archean, were replaced in the Paleoproterozoic by neutral aqueous potassium chloride ones and, after 2.0 billion years, by alkaline carbonate-sodium fluoride ones. This determined the evolution of igneous rocks of the Precambrian.

Keywords: Archaean, Paleoproterozoic, mantle fluids, evolution.