

Данные о горячей гетерогенной аккреции Земли – основа нового решения генетических проблем петрологии

Шкодзинский В.С.

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Аннотация. Полученные многочисленные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли приводят к новому решению генетических проблем глобальной петрологии. По этим данным земное ядро сформировалось раньше мантии в результате быстрого объединения железных частиц протопланетного диска под влиянием преимущественно магнитных сил. Импактное плавление выпадавшего на ядро силикатного материала обусловило образование глобального магматического океана. Его придонная часть кристаллизовалась и фракционировала под влиянием остывания и роста давления возникавших при аккреции верхних частей. Небольшая глубина раннего магматического океана и пониженная сила тяжести на еще небольшой Земле обусловили низкое давление в его фракционировавшем придонном слое и привели к образованию большого объема остаточных расплавов от толеитового до кислого состава. Всплывание кислых расплавов после завершения аккреции привело к формированию раннедокембрийских кристаллических комплексов и кислой коры континентов. Постепенное повышение интенсивности и температуры аккреции обусловили существование обратного геотермического градиента в мантии и отсутствие в ней конвекции. Всплывание остаточных расплавов из различных слоев затвердевавшего магматического океана привели к эволюции магматизма древних платформ от кислого до щелочно-ультраосновного и кимберлитового. Прогревание мантии изначально более горячим ядром обусловило возникновение в ней в неопротерозое прямого геотермического градиента и современных геодинамических обстановок. Магмы в них формируются в результате фрикционного и декомпрессионного переплавления легкоплавких дифференциатов магматического океана.

Ключевые слова: магматический океан, происхождение геосфер и магм.

Data on the hot heterogeneous accretion of the Earth – the basis for a new solution to genetic problems of petrology

Skodzinsky V.S.

Institute of Geology of Diamond and Noble Metals SB RAS, Yakutsk, shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Abstract. Numerous obtained evidence of the hot heterogeneous accretion of the Earth provides a new solution of the genetic problems of global petrology. According to these data, the Earth core has formed earlier than the mantle as a result of a rapid union of iron particles of the protoplanetary disk under the influence of predominantly magnetic forces. The impact melting of a silicate material dropped on the core led to the formation of a global magmatic ocean. Its bottom part crystallized and fractionated under the influence of the cooling and growth of the pressure that occurred during the accretion of the upper parts. The small depth of the early magmatic ocean and the reduced force of gravity on small the Earth led to a low pressure in its bottom layer and led to the formation of a large volume of residual melts from basic to acidic composition. The surfacing of acidic melts after completion of the accretion led to the formation of Precambrian crystalline complexes and crust of continents. A gradual increase in the intensity and accretion temperature led to the existence of a reverse temperature gradient in the mantle and the absence of convection in it. The surfacing of residual melts from different layers of the solidified magmatic ocean resulted in the evolution of magmatism of ancient platforms from acid to alkali-ultrasound and kimberlite. The warming of the mantle by the initially hotter core produced a direct geothermal gradient and modern geodynamic environments in the Neoproterozoic. Magmas in them are formed as a result of frictional and decompression melting of low-melting differentiations of the magmatic ocean.

Keywords: magmatic ocean, origin of geospheres and magmas.

Введение

На ранней стадии развития геологической науки, вследствие недостатка эмпирических данных, была принята максимально простая гипотеза холодной гомогенной аккреции Земли (Шмидт, 1962). Согласно ей наша планета образовалась в результате одновременного объединения относи-

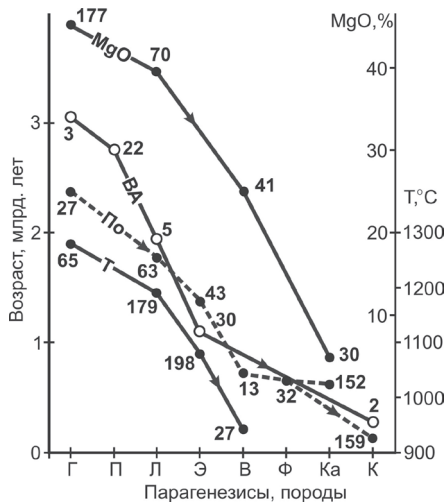


Рис. 1. Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По), включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования при 5 ГПа (линия Т) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO). Составы ксенолитов и включений в алмазах: Г – гарцбургитовый, П – перидотитовый нерасчлененный, Л – лерцолитовый, Э – эклогитовый, В – верлитовый и вебстеритовый, Ф – флогопитсодержащие породы, Ка – карбонатиты, К – кимберлиты. Числа у точек – количество использованных определений (Шкодзинский, 2015).

Fig. 1. Average isotopic ages of various mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line R), inclusions in diamonds (A line), average formation temperature at 5 GPa (T line) and average MgO content in rocks (MgO line). Compositions of xenoliths and inclusions in diamonds: G – harzburgite, P – peridotite undifferentiated, L – lherzolite, E – eclogite, V – wehrlite and websterite, F – phlogopite-bearing rocks, Ka – carbonatites, K – kimberlites. The number of points – the number of used definitions (Шкодзинский, 2015).

тельно холодных силикатных и металлических частиц под влиянием сил взаимного гравитационного притяжения. Геосферы возникли в результате разделения этих частиц по плотности в земных недрах, магмы образуются путем отделения выплавов в глубинных породах, подплавленных по влиянием радиогенного тепловыделения. Однако за длительное время использования этой гипотезы не было получено ни одного геологического доказательства ее справедливости. К настоящему времени установлено большое количество противоречащих ей данных.

Доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли

Известно, что падающие метеориты плавятся и частично испаряются в результате импактного тепловыделения. Расчеты показали, что под его влиянием вещество Земли могло разогреться до 34 000 °C (Рингвуд, 1982). Это подтверждается присутствием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах (линия MgO на рис. 1) и в кристаллической коре (Шкодзинский, 2018), соответствием среднего изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород (линии По и Т) последовательности образования при магматическом фракционировании, проекцией наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °C) на земной поверхности, равенством этих градиентов (3.5 град/км) рассчитанному градиенту в магматическом океане, возникшем в результате огромного импактного тепловыделения при аккреции.

Мантийные породы резко химически не равновесны с металлическим железом. Например, фугитивность кислорода в них в двадцать тысяч раз больше, чем необходимо для устойчивости металлического железа (O’Neil, 1990). Это указывает, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Железные частицы быстро объединились раньше силикатных под влиянием магнитных сил, поскольку при небольшом размере частиц они были в миллиарды раз мощнее гравитационных. Наглядно это иллюстрирует быстрое объединение намагниченных мелких железных предметов, тогда как под влиянием сил взаимного гравитационного притяжения они никогда не объединяются. Солнце во время аккреции имело в тысячи раз более мощное магнитное поле, чем современное, поскольку находилось на эволюционной стадии Тау-Тельца. Поэтому оно сильно намагнитило железные частицы, что подтверждается намагниченностью железа в метеоритах.

Происхождение геосфер

Кумулаты магматического океана сформировали ультраосновные породы мантии. Часть придонных основных расплавов заполняла импактные углубления на дне магматического океана и быстро компрессионно затвердела, что привело к возникновению множества тел эклогитов в мантии. Постепенное накопление расплавофильных компонентов в магматическом океане обусловило обогащение ими поздних кумулатов и эклогитов. Бедные ими породы образовались на ранних стадиях эволюции океана магмы. Всплывание и кристаллизация кислых остаточных расплавов при-

вели к образованию раннедокембрийских кристаллических комплексов и континентальной коры.

Сильное возрастание плотности в слоистом магматическом океане сверху вниз (от 2.3 до 2.8 г/см³) обусловило отсутствие в нем обширной конвекции расплавов после прекращения аккреции. Поэтому он длительно остывал и кристаллизовался сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь (рис. 2). Это является причиной большой продолжительности (около 2 млрд. лет) образования раннедокембрийских кристаллических комплексов. Закристаллизовавшиеся верхние части магматического океана вместе с начавшимися формироваться на них осадками часто становились плотнее нижних жидких. Поэтому они тонули и на их место изливались нижние обычно более мафические. Это объясняет чередование ортогнейсов, парагнейсов и основных кристаллических сланцев в большинстве раннедокембрийских комплексов (Шкодзинский, 2018). Выделение из магм кислотных газов (HCl, HF, H₂S и др.) приводило к кислотному выщелачиванию затвердевших приповерхностных пород. Это обусловило широкое развитие высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов среди парапород.

Остывание и кристаллизация магматического океана сверху вниз обусловили уменьшение в среднем в этом направлении изотопного возраста пород. Это противоречит принципу Стенона и затрудняет разработку схем стратиграфического расчленения древнейших пород. Гистограммы распределения температуры в гиперстенсодержащих и безгиперстеновых гнейсах не различаются. Это указывает, что образование пород относимых к гранулитовой фации обусловлено меньшим содержанием воды в исходных магмах и не связано с их большей высокотемпературностью, как обычно принимается. Это подтверждается частым переслаиванием гиперстеновых и безгиперстеновых гнейсов в одних и тех же обнажениях и отсутствием явлений более позднего развития гиперстена в гнейсах. Образование в кристаллизовавшемся магматическом океане объясняет выдержанную во всем мире магматическую температуру (800–850 °С) кристаллизации раннедокембрийских кристаллических комплексов, только регрессивную последовательность минералообразования в них, отсутствие их постепенных переходов в низкотемпературные породы и мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, теплоизолирующим влиянием которых иногда объясняли их гипотетический метаморфизм. Отделение эманаций из огромного по объему магматического океана обусловило образование часто уникальных по запасам рудных месторождений – железистых кварцитов, золота, полиметаллов, урана и других.

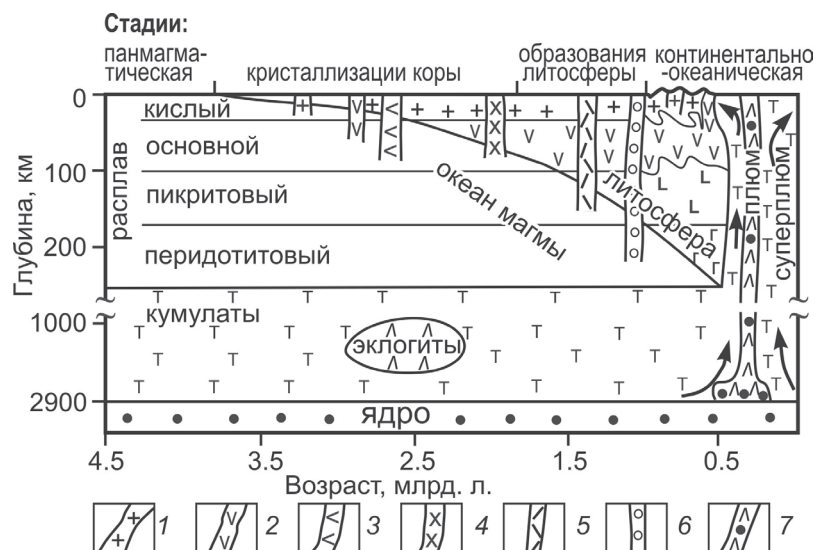


Рис. 2. Схема образования магм в различных геодинамических обстановках: 1 – кислых, 2 – основных, 3 – анортозитовых, 4 – щелочно-основных, 5 – щелочно-ультраосновных карбонатитсодержащих, 6 – кимберлитовых, 7 – океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра.

Fig. 8. Scheme of the formation of magmas in different geodynamic settings: 1 – acid, 2 – basic, 3 – anorthositic, 4 – alkaline-basic, 5 – carbonatite-bearing alkaline-ultrabasic, 6 – kimberlitic, 7 – oceanic and traps, sometimes containing xenoliths of the Earth's core.

Эволюция магматизма

С увеличением размера Земли и интенсивности аккреции повышалась температура и глубина магматического океана. Состав возникавших придонных остаточных расплавов эволюционировал до основного и ультраосновного. Это привело к образованию в магматическом океане слоев различного состава и обратного геотермического градиента в мантии, к отсутствию в ней конвекции и современных геодинамических обстановок на ранней Земле. В это время существовали геодинамические обстановки панмагматическая и образования земной коры и литосферы древних платформ путем затвердевания магматического океана (рис. 2). Кристаллизация и фракционирование слоистого океана сверху вниз и всплывание остаточных расплавов различных его слоев после завершения аккреции обусловили эволюцию магматизма древних платформ от кислого к основному, щелочно-ультраосновному карбонатитсодержащему и далее к кимберлитовому (рис. 1).

Длительное (около 2 млрд. лет) и глубокое фракционирование мощного (около 80 км) пикритового слоя магматического океана при остывании привело к гигантскому накоплению в его остаточных расплавах расплавофильных компонентов и объясняет образование в карбонатитах крупных месторождений редкоземельных и редких элементов и фосфатов. При горячей аккреции Земли алмаз формировался в кристаллизовавшемся перидотитовом слое магматического океана вследствие накопления углерода в остаточном расплаве, поскольку этот компонент почти не входил в состав формирующихся порообразующих минералов. Небольшое количество свободного углерода присутствовало в расплаве вследствие диссоциации углеродсодержащих соединений. Алмаз начал формироваться более 3 млрд. лет назад при еще преимущественно гарцбургитовом составе придонного перидотитового слоя. Это объясняет присутствие включений такого состава в алмазах и их наиболее древний возраст (рис. 1). Низкое содержание свободного углерода в расплавах обусловило относительно небольшое количество алмазов (обычно первые караты на тонну) даже в самых богатых трубках. В случае иногда предполагаемого привноса углерода флюидами или погружающимися при субдукции океаническими осадками содержание алмазов было бы в сотни – тысячи раз большим.

Очень низкая вязкость перидотитовых расплавов (десятые доли пуаза) обусловила большую скорость диффузии в них углерода. Поэтому он успевал достигать торцов слоев роста кристаллов алмаза и присоединялся к ним, поскольку здесь обнажалось больше свободных ковалентных связей углерода, чем на гранях. В результате путем послыйного тангенциального роста формировались идеальные острые реберные октаэдры алмаза с зеркально гладкими гранями. При фракционировании содержание кремния, алюминия и других многовалентных элементов в остаточных расплавах возрастало. Это приводило к увеличению их вязкости в тысячи раз, к уменьшению скорости диффузии углерода и к возрастанию степени пересыщения им расплава. Вследствие увеличения скорости возникновения новых центров кристаллизации уменьшалась площадь образующихся слоев роста на гранях и формировались выпуклые полицентрические, блочные, слоистые и округло-ступенчатые октаэдры. При дальнейшем уменьшении площади образующихся слоев на месте ребер и вершин возникали грани соответственно ромбододекаэдра и куба и формировались кристаллы переходной морфологии. Затем возникали ромбододекаэдры, кубы и агрегаты. Тангенциальный послыйный рост сменялся на радиальный и формировались многочисленные скульптуры на кристаллах. Накопление расплавофильных компонентов обусловило увеличение в сотни раз содержание примесей в поздних алмазах.

Резкое возрастание интенсивности геологических процессов в неопротерозое (Добрецов, 2011) указывает на прогревание мантии изначально на тысячи градусов более горячим ядром, на возникновение в ней прямого геотермического градиента и тепловой конвекции. Под ее влиянием сформировались океанические и субдукционные области и начала действовать современная тектоника литосферных плит. Значительно меньшие ядра на Марсе и Луне не смогли прогреть их мантии. Это объясняет отсутствие на них отчетливых признаков проявления плитной тектоники и современного вулканизма.

Существуют два типа мантийной конвекции. Прогревание изначально очень горячим ядром больших объемов мантии привело к их всплыванию и к возникновению огромных суперплюмов

преимущественно ультраосновного состава. Всплывание и декомпрессионное переплавление крупных тел экологитов обусловило образование более мелких плюмов преимущественно основного состава. Их одновременный подъем в одном и том же участке привел к возникновению «горячих точек» - цепи магматических тел с уменьшающимся по простиранию возрастом. При образовании океанических областей возникшие из постаккреционного магматического океана континентальная кора и литосфера были раздвинуты растекавшимся веществом суперплюмов. Это объясняет обычно отсутствие в океанах формировавшихся в этих геосферах магм кислых, щелочно-ультраосновных и кимберлитовых пород.

Всплывание и декомпрессионное переплавление экологитов привели к образованию траппов. Чаще всего их огромный объем (до миллионов кубических километров) и прямая корреляция его с возрастом обусловлены повышенной скоростью всплывания крупных тел экологитов. Интенсивное декомпрессионное плавление экологитов при всплытии привело к относительно быстрому формированию больших объемов траппов. Возникновение конвекции в мантии в неопротерозое – причина преимущественно фанерозойского возраста этих пород. Образование некоторых экологитов в пограничных с ядром импактных кратерах обусловило присутствие в траппах крупных (до десятков тонн) ксенолитов земного ядра.

При формировании базитов СОХ всплывали самые нижние части мантии, наиболее прогретые ядром. Бедность раннего магматического океана и сформированных из него нижних частей мантии расплавофильными компонентами объясняет наиболее примитивный состав базитов СОХ (N MORB). Процессы фракционирования тел основных магм в растекавшейся океанической мантии привели к накоплению в них расплавофильных компонентов и к образованию более обогащенных базитов океанических островов (E MORB). Неразрывная временная и пространственная связь магматизма с тектоническими деформациями, идентичность состава образующихся магм наиболее легкоплавким породам континентальной литосферы, обычно очень высокая величина начального отношения изотопов стронция в них (до 0.715 и выше), часто антидромная последовательность магматизма и результаты расчетов указывают на фрикционное образование магм в зонах субдукции и коллизии под влиянием деформаций, вызываемых давлением океанических плит. Большую эффективность фрикционного магнообразования демонстрирует небольшой спутник Юпитера Ио. На нем деформации недр под влиянием гравитационного притяжения то приближающихся, то удаляющихся при вращении Ганимеда, Европы и Юпитера привели к возникновению более четырехсот действующих вулканов и лавовых озер поперечником до двухсот километров. Расчеты, автохтонность анатектичеcko жильного материала в мигматитах указывают, что магмы не образуются в результате отделения выплавок в слабо подплавленных породах вследствие их огромной вязкости (10^{20} – 10^{21} пуаз).

Литература

1. Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск. Изд. НГУ. 2011. 492 с.
2. Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М. Изд-во: Недра. 1982. 294 с.
3. Шкодзинский В.С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск. Изд-во: СВФУ. 2014. 452 с.
4. Шкодзинский В.С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск. Изд-во: СВФУ. 2018. 274 с.
5. Шмидт О.Ю. Происхождение Земли и планет. М. Изд-во: АН СССР. 1962. 132 с.
6. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // *Meteoritics*. 1990. V. 25 (4). P. 395.