

УДК 552.11

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГМ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ В ОКЕАНИЧЕСКИХ И СУБДУКЦИОННЫХ ОБЛАСТЯХ С УЧЕТОМ ДАННЫХ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ*

Шкодзинский В. С.

ФГБУН Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

E-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Полученные многочисленные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли и рассчитанные количественные модели магм приводят к принципиально новому решению генетических проблем петрологии. Они свидетельствуют о формировании геосфер и исходного вещества магм в результате фракционирования глобального магматического океана, возникшего в результате огромного импактного тепловыделения при аккреции мантии. Вследствие повышения температуры по мере аккреции сначала существовал обратный геотермический градиент и на ранней Земле не было современных геодинамических обстановок. Постепенный прогрев мантии изначально очень горячим ядром привел к образованию в неопротерозое прямого геотермического градиента, конвекции и океанических и субдукционных областей. В океанах магмы формируются в результате декомпрессионного переплавания при всплывании линз эклогитов, возникших путем заполнения расплавами синаккреционного магматического океана импактных кратеров. Магмы субдукционных областей – результат фрикционного переплавания дифференциатов магматического океана. Вулканические взрывы происходят под влиянием высокого давления газовой фазы, законсервированной декомпрессионным затвердеванием магм на малоглубинной стадии подъема.

Ключевые слова: магматический океан, генезис магм, вулканические взрывы.

DOI: 10.34078/1814-0998-2022-1-40-48

ВВЕДЕНИЕ

Анализ (Шкодзинский, 2014) показал, что нерешенность генетических проблем петрологии во многом обусловлена ошибочностью принятой гипотезы маглообразования за счет отделения выплавов в частично подплавленных глубинных породах. Получено большое количество противоречащих ей данных. Изучение единственного доступного примера массового частичного плавления мигматитов (Шкодзинский, 1985) свидетельствует о существовании в них двух главных генетических разновидностей. В наиболее распространенных мигматизированных ортогнейсах имеются признаки образования гранитного жильного материала из остаточных расплавов магм, родоначальных для ортогнейсов. В высокоглиноземистых парагнейсах темноцветная составляющая в гранитном жильном материале содержит в 2–3 раза больше без-

водных минералов (граната, гиперстена, кордиерита), чем в субстрате. Они в нем на 1–3 % более магнезиальные и имеют несколько более высокую температуру кристаллизации. Это указывает на образование гранитного материала путем дегидратационного плавления парагнейсов. Он равномерно распределен в одинаковых по составу парагнейсах, поэтому является автохтонным даже при содержании 40 % и не формировал гранитные магмы. Это подтверждается другим составом и изотопным возрастом крупных тел гранитов, встречающихся среди анатектических мигматитов.

Предполагается небольшая степень частичного плавления мантийных пород (0,1–20 %; Грин, 1973) при маглообразовании. Однако при низкой степени частичного плавления породы имеют вязкость, равную 10^{19} – 10^{21} пуаз (рис. 1). Скорость всплывания шарообразных тел W можно оценить по формуле Стокса

$$W = 2\Delta\rho g R^2 / 9\eta. \quad (1)$$

При разности плотностей $\Delta\rho = 600 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ускорении силы тяжести $g = 9.81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ и вязкости

© Шкодзинский В. С., 2022

*В продолжение статьи «Генезис магм с позиции горячей гетерогенной аккреции Земли», вышедшей в журнале «Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН» № 2 за 2021 г.

астеносферы $\eta = 10^{20} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ скорость всплытия капли основного расплава радиусом 0.01 м составит $W = 2 \cdot 600 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 9.8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 0.01^2 \text{ м}^2 / 9 \cdot 10^{20} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \approx 1.2 \cdot 10^{-21} \text{ м/с}$. Следовательно, за 5 млрд лет ($1.575 \cdot 10^{17} \text{ с}$), т. е. больше чем за всю историю Земли, капля всплывет всего на $1.2 \cdot 10^{-21} \cdot 1.575 \cdot 10^{17} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, т. е. на доли миллиметра. Поэтому слабо подплавленные породы не могут быть источником магм. Это подтверждается экспериментами Н. Т. Арндта (Arndt, 1977), по которым в расплавленном менее чем на 30 % перидотите не происходило разделение расплава и твердых фаз.

Таким образом, природные, расчетные и экспериментальные данные вполне определенно свидетельствуют, что основанное на гипотезе холодной гомогенной аккреции Земли предположение о возникновении магм путем отделения выплавок в подплавленных породах является ошибочным. Это предположение уже более полувека безоговорочно принимается в тысячах публикаций, несмотря на полное отсутствие доказательств его справедливости и значительное количество противоречащих данных.

Ошибочность гипотезы магмообразования путем частичного плавления означает, что в природе не существуют широко предполагаемые процессы деплетирования, дифференциации мантии и формирования земной коры путем гипотетического отделения выплавок. Эти предположения были необходимы с позиций гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, предложенной математиком О. Ю. Шмидтом в середине прошлого столетия, согласно которой наша планета сформировалась путем одновременного объединения под влиянием гравитационных сил относительно холодных железных и силикатных частиц протопланетного облака. Последующее разделение в земных недрах частиц по удельному весу привело к возникновению ядра и мантии. К настоящему времени получено большое количество данных, противоречащих этой гипотезе.

Известно, что падающие метеориты плавятся и частично испаряются в результате ударного тепловыделения. Расчеты показали, что под его влиянием вещество Земли могло разогреться до $34\,000^\circ\text{C}$ (Рингвуд, 1982). Это подтверждается присутствием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах и в кристаллической коре, соответствием изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород последовательности образования при магматическом фракционировании, проекцией наиболее ранних геотермических гради-

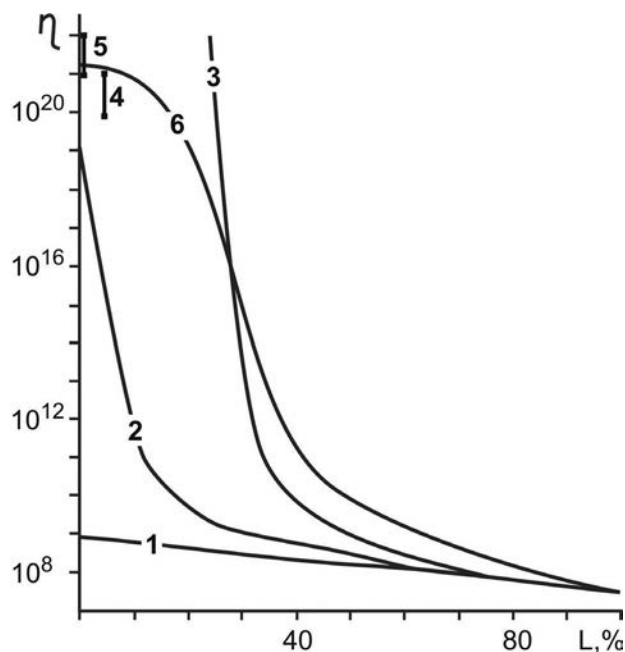


Рис. 1. Вязкость гранитных магм (η , пуаз): 1 – стекла, 2, 3 – рассчитанная по формулам Эйнштейна – Роскоу при неодинаковых и одинаковых размерах твердых шаров, 4 – астеносферы, 5 – земной коры, 6 – принятая (Шкодзинский, 1985). L, % – содержание расплава

Fig. 1. Viscosity of granitic magmas (η , poise): 1 – glass, 2, 3 – calculated by the Einstein – Roscoe formulas for different and identical sizes of hard spheres, 4 – asthenosphere, 5 – Earth's crust, 6 – accepted (Shkodzinskiy, 1985). L, % – melt content

ентов в область очень высокой температуры (до 1000°C) на земной поверхности, соответствием этих градиентов (3.5°C/км) распределению температуры в магматическом океане, возникшем в результате ударного тепловыделения (Шкодзинский, 2018).

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом (O'Neil, 1990) 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 в это время 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 МАНТИИ И КОРЫ

Расчеты (Шкодзинский, 2014) свидетельствуют, что выпадавшие на железное ядро силикатные частицы плавилась под влиянием импактного тепловыделения и сформировали глобальный магматический океан на самой ранней стадии аккреции мантии. Представления о магматическом океане получили широкое распространение в последние десятилетия. Но в них обычно не рассматривается наиболее важная его синаккреционная эволюция, что не позволяет правильно оценить роль магматического океана в геологических процессах. Между тем она является определяющей и приводит к принципиально новому решению генетических проблем. Под влиянием роста давления образующихся верхних частей придонная часть магматического океана кристаллизовалась и фракционировала при аккреции. Небольшая глубина раннего магматического океана и пониженная сила тяжести на еще небольшой Земле обусловили низкое давление в его придонном слое. Поэтому раннее придонное фракционирование было низкобарическим, что привело к образованию большого количества остаточных расплавов от кислого до толеитового состава и явилось причиной широкого распространения этих пород.

Кумулаты сформировали мантию. 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. Всплывание и кристаллизация кислых расплавов привели к образованию раннедокембрийских кристаллических комплексов и континентальной коры. С увеличением размера Земли и интенсивности аккреции повышалась температура и глубина магматического океана. Состав возникавших придонных остаточных расплавов эволюционировал до ультраосновного, что привело к образованию в магматическом океане слоев различного состава и обратного геотермического градиента в мантии, к отсутствию конвекции и современных геодинамических обстановок. В это время существовали обстановки панмагматическая и образования земной коры и литосферы древних платформ путем затвердева-

ния магматического океана. Кристаллизация, 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.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГМ В ОКЕАНИЧЕСКИХ И СУБДУКЦИОННЫХ ОБЛАСТЯХ

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, океанических и субдукционных областей и начало современной тектоники литосферных плит. Значительно меньшие ядра на других планетах земной группы не смогли прогреть их мантии. Это объясняет казавшееся загадочным 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 тел эклогитов 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 мантийных суперплюмов. Это объясняет отсутствие в океанах формировавшихся в этих геосферах магм кислых, щелочно-ультраосновных и кимберлитовых магматических пород. При формировании базитов СОХ и траппов всплывали самые нижние части мантии, наиболее прогретые ядром. Это подтверждается изредка присутствием в траппах крупных (до десятков тонн) тел никелистого (до 7 %) самородного железа. Они имеют признаки образования из ксенолитов земного ядра (Шкодзинский, 2020), возникших в самых ранних импактных кратерах при падении крупных планетезималей на начальной стадии аккреции мантии. Присутствие ксенолитов ядра свиде-

тельствует об однослойной конвекции в мантии и о формировании основных магм в фанерозое путем декомпрессионного переплавления тел эклогитов при всплывании. Их толеитовый состав определялся процессами придонного малобарического фракционирования синаккреционного магматического океана. Бедность еще раннего океана расплавофильными компонентами обусловила наиболее примитивный состав базитов срединно-океанических хребтов (N MORB) и железосодержащих траппов. 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).

Погружение океанических плит в мантию обусловило возникновение субдукционных геодинамических обстановок. В многочисленных публикациях обычно предполагается образование магм в зонах субдукции путем частичного плавления основных пород под влиянием потоков воды, выделяющейся из погружающихся океанических осадков. Однако известно, что даже в приповерхностных условиях некоторые породы непроницаемы для нефти, воды и газов и создают ловушки для них. В областях магмообразования, где поры и трещины закрыты под влиянием очень высоких давления и температуры, движение флюидных потоков в высшей степени маловероятно. Это подтверждается результатами высокоточных детальных исследований

методом сейсмической томографии, которые не выявили признаков существования потоков воды под вулканами Камчатки (Гордиенко, Метелкин, 2016). Установлено, что в энсиматических вулканических дугах вулканы извергают основные магмы, а в энсиалических – преимущественно (более 65 %) кислые. Следовательно, состав магм в них идентичен составу наиболее легкоплавких пород в фундаменте. Это и рассмотренные выше данные свидетельствуют, что путем обычно предполагаемого частичного плавления основных пород не формировались кислые магмы энсиалических островных дуг. Они возникали путем переплавления кислых пород, широко распространенных в континентальной земной коре.

Зоны погружения океанических плит выглядят парадоксальными. В них перемещается холодная плита (рис. 2), поэтому здесь, казалось бы, должен отсутствовать магматизм и высокотемпературные геотермические градиенты. Однако в этих участках наоборот, максимально распространены вулканы и наблюдается повышенный тепловой поток. Эти явления свидетельствуют о существовании крупного внутреннего источника тепла в участках погружения. Природа этого источника становится понятной, если учесть, что погружающаяся океаническая плита оказывает огромное давление на противостоящую ей литосферу и вызывает ее деформации. Присутствие обширных аккреционных комплексов в древних зонах субдукции, интен-

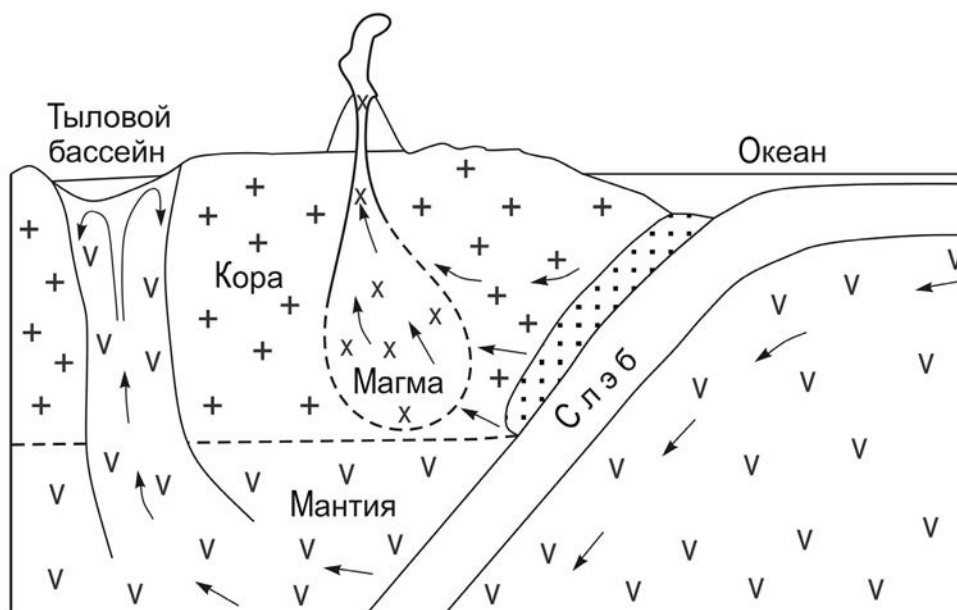


Рис. 2. Схема образования магм в областях субдукции. Точки – аккреционный комплекс

Fig. 2. Scheme of magma formation in subduction areas. Points indicate the accretion complex

сивная складчатость и катаклазированность пород, присутствие высоких горных хребтов указывают, что сокращение ширины континентальной коры за счет деформаций достигало сотен километров.

Как известно, даже холодные приповерхностные породы иногда плавятся в зонах тектонических разломов с образованием псевдотрахитов. Современные стрессовые напряжения в литосфере в районе Курильской и Японской островных дуг составляют 200–400 МПа (Короновский, 1997). В островных дугах расстояние между вулканами равно в среднем 100 км, континентальная кора преимущественно кислого состава имеет среднюю мощность 40 км. В быстросрединных срединно-океанических хребтах кора раздвигается со скоростью до 20 см в год.

Выделение тепловой энергии Q при деформациях можно оценить по формуле

$$Q = \eta h L / I. \quad (2)$$

При стрессовом напряжении $\sigma = 400$ МПа, механическом эквиваленте теплоты $I = 427$ кг · м/ккал перемещение блока литосферы мощностью $h = 40$ км, шириной $b = 100$ км на $L = 100$ м за тысячу лет приведет к выделению тепловой энергии $Q = 400 \cdot 102000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 40000 \text{ м} \cdot 100000 \text{ м} \cdot 100 \text{ м} / 427 \text{ кг} \cdot \text{м/ккал} = 3.794 \cdot 10^{16}$ ккал.

Количественная модель гранитных магм (рис. 3) показывает, что в очагах магмообразования вследствие высокого давления (1–1.5 ГПа) содержание расплава в кислых магмах составляет в среднем около 40 %, что согласуется с частичным прохождением поперечных сейсмических волн через корни вулканов. Остальной расплав возникает под влиянием декомпрессии при подъеме. При энтальпии плавления диорита $E = 50$ ккал/кг за счет фрикционного тепловыделения сформируется $M = Q/E = 3.794 \cdot 10^{16} \text{ ккал} \cdot (50 \text{ ккал/кг} \cdot 0.4)^{-1} = 1.8676 \cdot 10^{15}$ кг или примерно 0.8 км³ андезитовой магмы. Подъем

этой магмы приведет к 16 сильным (в среднем по 0.05 км³) извержениям вулкана за тысячелетие на 100 км протяженности вулканической дуги или к множеству более мелких. Это примерно соответствует частоте извержений в вулканических дугах.

Большую эффективность фрикционного плавления демонстрирует небольшой спутник Юпитера Ио. На нем деформации недр под влиянием гравитации то приближающихся, то удаляющихся при вращении других спутников обусловили существование более 400 действующих вулканов и озер лавы поперечником до 200 км. Фрикционное происхождение субдукционных магм подтверждается неразрывной временной и пространственной связью магматизма с тектоническими движениями. Линия подъема 10 на рис. 3 иллюстрирует, что в случае обычно предполагаемого подъема выплавок из очагов магмообразования магмы в приповерхностных условиях имели бы примерно на 150 °С более высокую температуру, чем ликвидус, и в них не было бы вкрапленников. Редкость не содержащих вкрапленников магматических пород также подтверждает фрикционное происхождение магм в зонах субдукции. Плавление происходит преимущественно в участках наиболее ин-

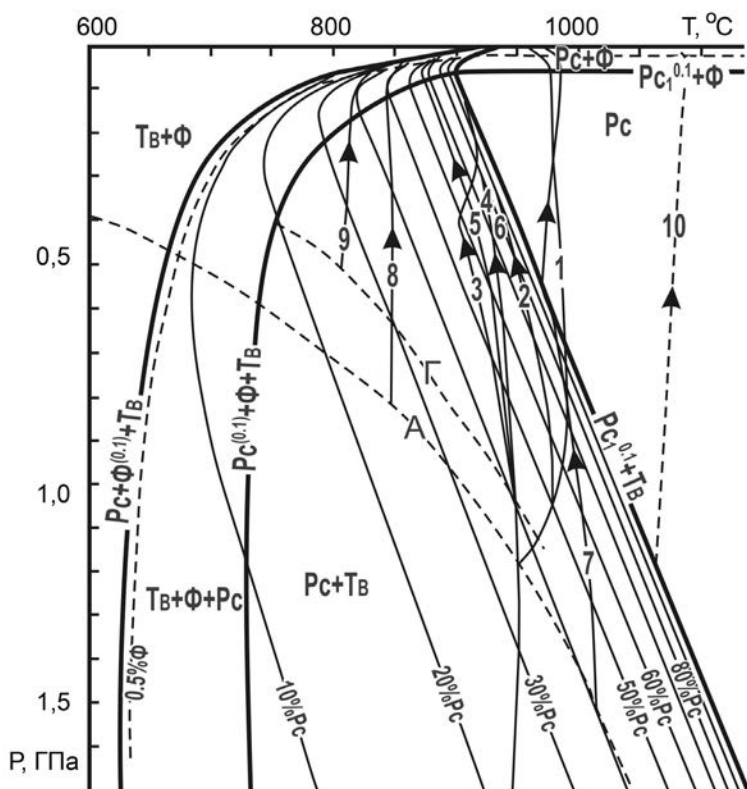


Рис. 3. P-T диаграмма фазового состава и эволюции (линии со стрелками) кислых магм с содержанием 1 % H₂O и 0.1 % CO₂. P_с^{0.1} – расплав и содержание в нем воды и углекислоты (нижний и верхний индексы), Tв – твердые фазы, Ф^(0.1) – флюид и отношение в нем углекислоты к воде. А – палеогеотерма Алданского щита, Г – более высокотемпературная геотерма

Fig. 3. P-T diagram of the phase composition and evolution (lines with arrows) of acid magmas with 1 % of H₂O and 0.1% CO₂ contents. P_с^{0.1} – melt and content of H₂O and CO₂ in it, Tв – solid phases, Ф^(0.1) – fluid and the acid-water ratio in it. А – paleogeotherm of the Aldan shield, Г – higher-temperature geotherm

тенсивных деформаций. Если эти участки находятся в кислых породах, то возникают гранит-риолитовые магмы. В случае среднего или основного состава этих участков формируются идентичные им по составу магмы. Это хорошо объясняет обычно пестрый полиформационный состав субдукционных магматических пород и его различия в разных извержениях.

Причленение аккреционных комплексов к континентальной литосфере чаще всего с избытком компенсировало ее отодвигание под влиянием давления океанической плиты. Это давление и сжатие приурочены к глубинным частям литосферы. Ее приповерхностные части подвергались растяжению вследствие отсутствия на них давления океанической плиты (см. рис. 2) и под влиянием расклинивающего воздействия внедрявшихся магм. Выдавливание пластичных глубинных частей мантии под влиянием опускающейся океанической плиты, вероятно, приводило к процессам растяжения в тылу островных дуг и к возникновению задуговых бассейнов. Декомпрессионно-фрикционное переплавление поздних основных дифференциатов магматического океана является причиной повышенного содержания расплавофильных компонентов в возникающих здесь магмах.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ

Для субдукционных областей характерны грандиозные взрывные вулканические извержения. Зачастую они сопровождаются экологическими катастрофами, поэтому выяснение их происхождения имеет практическое значение. Существуют фреатомагматическая и флюидно-магматическая гипотезы происхождения вулканических взрывов. Первая предполагает их возникновение в результате взрывного выделения паров воды, образовавшихся под влиянием соприкосновения магм с грунтовыми водами. Однако в многочисленных случаях стекания в водоемы даже очень высокотемпературных базальтовых магм (1000–1200 °C) не происходят взрывы. Образующийся пар спокойно отделяется, что обусловлено большой теплоемкостью воды и поэтому медленным ее испарением. Во флюидно-магматической гипотезе предполагается взрывной прорыв газов, накопившихся под перекрывающими породами. Но образование гидротермальных месторождений на расстоянии многих километров от родоначальных магматических тел свидетельствует, что малоглубинные породы вследствие их трещиноватости обычно проницаемы для горячих газов и не могут существенно препятствовать отделению магматиче-

ских эманаций. Обе гипотезы не объясняют тонкое дробление в основном магматических, а не вмещающих пород.

Из этого следует, что взрывы происходят под влиянием внутренних процессов в магмах. Для выяснения их природы необходима разработка детальной модели эволюции магм. На рис. 3 приведена количественная Р-Т диаграмма фазового состава и эволюции кислых магм, впервые рассчитанная по опубликованным экспериментальным и термодинамическим данным (Шкодзинский, 1985). Она иллюстрирует существование в магмах обычно не учитываемых явлений – отсутствие самостоятельной флюидной фазы при высоких давлениях и температуре вследствие полного растворения ее в расплаве (поле $P_c + T_v$), возрастание содержания твердых фаз в бесфлюидном поле с увеличением давления и его падением во флюидосодержащем, относительно низкотемпературном.

Последнее явление определяет главные особенности малоглубинной эволюции большинства магм. Оно обуславливает декомпрессионное затвердевание верхних частей колонн среднетемпературных и относительно низкотемпературных магм (траектории подъема магм 5, 8, 9 на диаграмме) после вскипания их при подъеме (линия $P_c^{(0.1)} + \Phi + T_v$) и вызвано снижением давления воды, имеющей свойства сильного плавня. Такое затвердевание является естественным следствием отрицательного наклона на Р-Т диаграммах линии солидуса при избытке воды при небольшом давлении. Вследствие этого большинство линий подъема магм пересекают его. Поэтому существование декомпрессионного затвердевания очевидно, хотя оно обычно не учитывается. Быстрое затвердевание расплава происходит путем его остеклования, так как в очень вязких кислых магмах кристаллы не успевают зарождаться и вырастать. Вследствие затвердевания приповерхностных частей магматические колонны могли прекращать подъем. Это объясняет существование обширных поясов гранитных батолитов в складчатых областях при отсутствии или незначительном распространении кислых вулканитов. В апикальных частях батолитов обычно находятся мощные зоны мелкозернистых гранитов с аллотриоморфнозернистой основной массой, возникшей в результате более поздней раскристаллизации остеклованных магм.

В субдукционных вулканических дугах давление океанической литосферы чаще всего приводило к выдавливанию декомпрессионно затвердевающих магм. Воздымание, деформации поверхности вулканов и многочисленные мелкие землетрясения перед вулканическим извержением

ем отражают это выдавливание. Эти явления часто происходят при отсутствии отделения газов, что указывает на консервацию их процессами декомпрессионного затвердевания. Вследствие замедления, а затем прекращения процессов расширения в затвердевающих частях колонн создавалось высокое внутреннее давление пузырьков газа. При дальнейшем подъеме оно начинало сильно превосходить внешнее давление. В результате происходили эксплозивная дезинтеграция затвердевших частей магматических колонн и перекрывающих пород и взрывные вулканические извержения.

При взрыве динамита возникает давление 1.25 ГПа. Для раздробления 1 м³ гранита необходимо 1.18 кг этого вещества. Давление начала декомпрессионного затвердевания среднетемпературных кислых магм (линия подъема 9 на рис. 2) составляет около 0.11 ГПа. Для

дробления 1 м³ гранита необходимо расширение 1.25 ГПа · 1.18 кг/0.11 ГПа ≈ 13.4 кг паров воды, в то время как 1 м³ магмы содержит ее около 2200 кг · 0.01 = 22 кг, т. е. примерно в 1.6 раза больше. То есть количества воды, содержащейся в кислых магмах, вполне достаточно для взрывной дезинтеграции под ее влиянием их декомпрессионно затвердевших частей. Дезинтеграция облегчается равномерным распределением пузырьков сжатых паров воды в остеклованных магмах.

Вследствие всплывания и выжимания при магнообразовании дифференциатов огромного магматического океана объем возникающих кислых магм может быть очень большим. Это определяет возможность существования мощных взрывных вулканических извержений. Например, при извержении вулкана Йеллоустонского парка 2.5 млн л. н. образовалось 2450 км³

пепла. Взорвалась декомпрессионно затвердевавшая магма, равная по объему крупному гранитному батолиту. Подобные извержения вызывают экологические катастрофы. Для их предсказания необходимо знание строения и динамики деформаций глубинных частей земной коры в областях вулканизма. Возникновение крупных извержений может указывать на исчерпание кислых магм под вулканом и на невозможность новых катастрофических извержений.

В случае относительно низкотемпературных магм выбрасывается только пепел, а лава вообще не изливается, как при извержении влк. Сен-Хеленс (Eichelberg, Hayes, 1982). В нем сначала произошел сильный выброс газов с раздробленным стеклом, что отражает дезинтеграцию самой верхней части затвердевшей магматической колонны. В дальнейшем с интервалом в секунды происходило большое количество более поздних взрывов, которые по кругу окаймляли первый взрыв. Затем возникло еще одно более обширное кольцо взрывов. Очевидно, что образование этих расширяющихся колец взрывов связано с дезинтеграцией все более глубинных частей расширяющейся вниз декомпрессионно затвердевшей магматической колонны.

Вулканические взрывы отличаются от искусственных тем, что в них вызывающее взрыв вещество (в

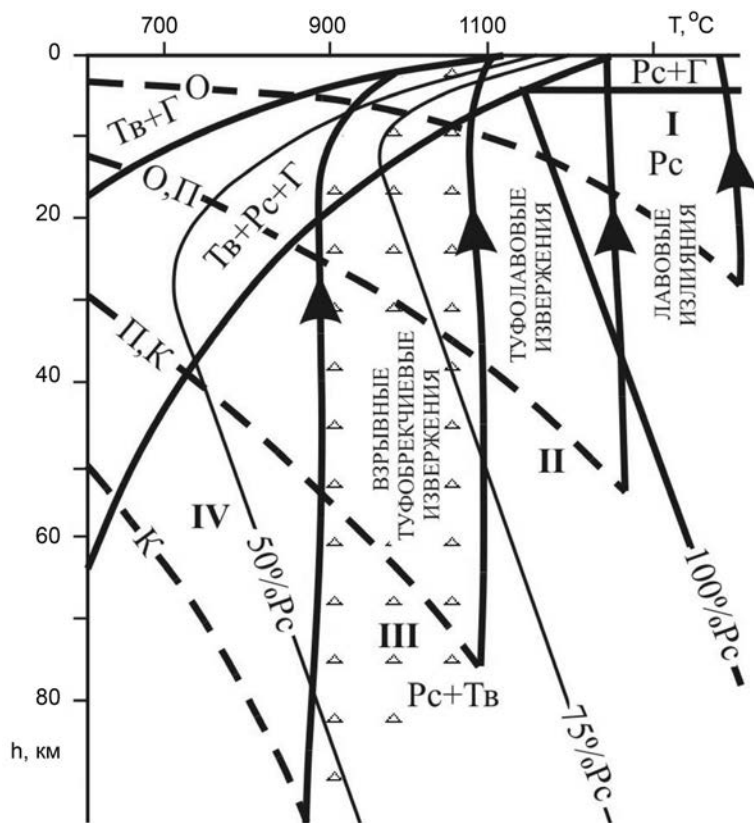


Рис. 4. Обобщенная фазовая P-T диаграмма магм. Г – газ, Pc – расплав, Тв – твердые фазы. Линии геотермических градиентов: О – океанического, ОП – океанического переходного, ПК – переходного континентального, К – континентального. Поля: I – лавовых излияний, II – туфолоавовых извержений, III – взрывных туфобрекчиевых извержений, IV – отсутствие извержений

Fig. 4. Generalized phase P-T diagram of magmas. Г – gas, Pc – melt, Тв – solid phases. Lines of geothermal gradients: О – oceanic, ОП – oceanic transitional, ПК – transitional continental, К – continental. Fields: I – lava eruptions, II – tuff-lava eruptions, III – tuff eruptions, IV – no eruptions

основном пары воды) очень равномерно распределено в остеклованных магмах чаще всего в виде микроскопических пузырьков. Это определяет очень тонкое дробление большей части остеклованных магм и образование огромного количества обломков преимущественно микронного размера. Вместе с расширением паров воды при взрыве примерно в тысячу раз это часто обуславливало образование огромного объема клубящихся туч. Из обломков, видимо, продолжалось выделение газов, поэтому палящая туча могла быстро распространяться на большие расстояния на возникшей газовой подушке. Угловатая форма стекловатых частиц обуславливала большое абразивное воздействие палящих туч. При взрывном дроблении не полностью затвердевших частей магматических колонн формировались игнибриты, в которых обломки стекла длительно сохраняли пластичность и обычно сваривались после выпадения. В искусственных взрывах обычно возникают намного более крупные обломки. Это подтверждает рассматриваемую декомпрессионную природу вулканических взрывов.

Вследствие образования в среднем на более ранней стадии постаккреционного фракционирования исходных субстратов основные магмы содержат значительно меньше летучих компонентов, чем кислые, и поэтому имеют очень высокую начальную температуру. По этой причине эти магмы чаще всего не подвергаются значительным процессам декомпрессионного затвердевания при подъеме и легко изливаются на земную поверхность. Это объясняет фундаментальное различие в размещении кислых и основных пород. Первые представлены огромным количеством интрузий, вторые залегают преимущественно в виде вулканических тел.

Различное поведение высокотемпературных и относительно низкотемпературных магм на малоглубинной стадии подъема позволяет объяснить многообразие вулканических извержений. Это удобно сделать на основании единой обобщенной схематической Р-Т диаграммы фазового состава магм (рис. 4).

Подъем самых высокотемпературных мафических магм, соответствующих полю I на диаграмме, сопровождается только выделением газов. Такие магмы остаются маловязкими и спокойно изливаются и растекаются по земной поверхности иногда с огромной скоростью. Они характерны для траппов и океанических областей. Этот тип лавовых излияний обычно называют гавайским.

Магмы, соответствующие полю II диаграммы, частично декомпрессионно затвердевают на приповерхностных стадиях подъема. Поэтому их из-

лияния сопровождаются выбросом туфов. Этот тип извержений (плинианский) является туфолововым. В поле III магмы не могут достигать земной поверхности в жидком состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, учет горячей гетерогенной аккреции Земли и рассчитанные количественные модели магм позволили получить принципиально новое решение генетических проблем магматической петрологии, хорошо согласующееся с эмпирическими данными. Полученные результаты свидетельствуют, что геосферы и исходное вещество магм возникли в результате фракционирования глобального магматического океана. Постепенный прогрев мантии изначально очень горячим ядром привел к возникновению в ней в неопротерозое прямого геотермического градиента и конвекции. Всплытие мантийных суперплюмов обусловило образование океанических и субдукционных областей. Магмы в океанах формировались преимущественно путем декомпрессионного переплавления тел эклогитов, возникавших при заполнении импактных кратеров придонными расплавами синаккреционного магматического океана. Магмы областей субдукции образовались путем фрикционного переплавления дифференциатов магматического океана. Вулканические взрывы происходят под влиянием высокого давления флюидной фазы, законсервированной декомпрессионным затвердеванием магм на малоглубинной стадии подъема. Многообразие состава пород на Земле обусловлено преимущественно процессами магматического фракционирования.

ЛИТЕРАТУРА

- Гордиенко И. В., Метелкин Д. В. Эволюция субдукционного магматизма на неопротерозойской и вендераннепалеозойской активных окраинах Палеоазиатского океана // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 91–108.
- Грин Д. Х. Состав базальтовых магм как критерий условий их возникновения при вулканизме // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана. Москва : Мир, 1973. С. 242–261.
- Добрецов Н. Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск : Изд-во НГУ, 2011. 492 с.
- Короновский Н. В. Напряженное состояние земной коры // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 1. С. 50–56.
- Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. Москва : Недра, 1982. 294 с.
- Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. Москва : Наука, 1985. 232 с.

Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск : Изд-во СВФУ, 2014. 452 с.

Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск : Изд-во СВФУ, 2018. 274 с.

Шкодзинский В. С. Вынос обломков земного ядра основными магмами // Наука и техника в Якутии. 2020. № 1. С. 3–6.

Arndt N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite // *Carnegie Institution Washington Yearbook*. 1977. 76. P. 424–428.

Eichelberg J. C., Hayes D.V. Magmatic model for Mount St. Helens blast of May 18, 1980 // *Journal of Geophysical Research*. 1982. B87 (9). P. 37–49.

O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: Implications for the origin of the Earth // *Meteoritics*. 1990. 25 (4). P. 395.

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

Поступила после доработки 12.02.2022 г.

ORIGIN OF MAGMAS AND VOLCANIC EXPLOSIONS IN OCEANIC AND SUBDUCTION AREAS, CONSIDERING DATA ON HOT HETEROGENEOUS ACCRETION OF THE EARTH

V. S. Shkodzinskiy

Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk

The obtained numerous proofs of hot heterogeneous accretion of the Earth and the calculated quantitative models of magmas lead to a fundamentally new solution for the genetic problems of magmatic petrology. They indicate the formation of geospheres and the initial substance of magmas resulted from fractionation of the global magmatic ocean, which arose as a result of a huge impact heat release during mantle accretion. Due to the increase in temperature as accretion progressed, a reverse geothermal gradient first existed in the mantle, and on the early Earth there were no modern geodynamic conditions. The gradual warming of the mantle by the initially very hot core led to the formation of a direct geothermal gradient and convection as well as oceanic and subduction regions in the Neoproterozoic. In the oceans, magmas are formed as a result of decompression melting during the surfacing of eclogite lenses, which emerged by way of filling impact craters with melts of the synaccretionary magmatic ocean. Magmas of subduction regions are the result of frictional melting of the magmatic ocean differentiates. Volcanic explosions occur under the influence of high pressure of the gas phase preserved by decompressional solidification of magmas at the shallow stage of ascent.

Keywords: magmatic ocean, genesis of magmas, volcanic explosions.

REFERENCES

Arndt, N. T., 1977. The Separation of Magmas from Partially Molten Peridotite, *Carnegie Institution Washington Yearbook*. 76, 424–428.

Eichelberg, J. C., Hayes, D. V., 1982. Magmatic Model for Mount St. Helens Blast of May 18, 1980, *Journal of Geophysical Research*. B87 (9), 37–49.

Gordienko, I. V., Metelkin, D. V., 2016. The Evolution of the Subduction Zone Magmatism on the Neoproterozoic and Early Paleozoic Active Margins of the Paleoasian Ocean, *Russian Geology and Geophysics*. 57, 1, 69–81 [In Russian].

Green, D. H., 1973. Basalt Magmas Composition as a Criterion for the Conditions of Their Emergence during Volcanism. *Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks of the Ocean Floor*. Moscow, Mir. 242–261 [In Russian].

Dobretsov, N. L., 2011. Fundamentals of Tectonics and Geodynamics. Novosibirsk, Novosibirsk State University [In Russian].

Koronovsky, N. V., 1997. Tense State of the Earth's Crust, *Sorotsky Educational Journal*. 1, 50–56 [In Russian].

O'Neil, H. S., 1990. Oxygen Fugacity and Siderophile Elements in the Earth's Mantle: Implications for the Origin of the Earth, *Meteoritics*. 25 (4), 395.

Ringwood, A. E., 1982. Origin of the Earth and the Moon. Moscow, Nedra [In Russian].

Shkodzinskiy, V. S., 1985. Phase Evolution of Magmas and Petrogenesis. Moscow, Nauka [In Russian].

Shkodzinskiy, V. S., 2014. Petrology of Lithosphere and Kimberlites (Model of Hot Heterogeneous Accretion of the Earth). Yakutsk, North-Eastern Federal University in Yakutsk [In Russian].

Shkodzinskiy, V. S., 2018. Global Petrology by Modern Data on Hot Heterogeneous Accretion of the Earth. Yakutsk, North-Eastern Federal University in Yakutsk [In Russian].

Shkodzinskiy, V. S., 2020. Removal of the Earth's Core Fragments by Basic Magmas, *Nauka i Tekhnika v Yakutii*. 1, 3–6 [In Russian].