

УДК 551.24

МЕХАНИЗМЫ ТРАНСЛЯЦИИ ГЛУБИННЫХ ИМПУЛЬСОВ ВО ВНЕШНИЕ ОБОЛОЧКИ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ (НА ПРИМЕРЕ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ)

© 2023 г. Е. В. Шарков^а *, М. М. Богина^а, А. В. Чистяков^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: esharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.01.2023 г.

После доработки 08.02.2023 г.

Принята к публикации 10.04.2023 г.

Как известно, в истории Земли периодически происходит активизация тектономагматических процессов, когда без видимых внешних причин они резко усиливаются. Очевидно, все это связано с особенностями развития глубинных петрологических процессов, своеобразным отражением которых и являются события во внешних оболочках современной Земли (тектоносфере), однако суть этих процессов и механизмы их трансляции в тектоносферу остаются слабо изученными. Мы рассмотрели эту проблему на примере ее Позднекайнозойской (неоген-четвертичной) глобальной активизации. Как известно, современная Земля является охлаждающимся телом с затвердевающим жидким железным ядром. Этот процесс должен сопровождаться целым рядом термодинамических, физических и физико-химических эффектов, которые и могли бы привести к внутренней активизации нашей планеты. Мы постарались разобраться в этих проблемах с помощью имеющихся современных геологических, петрологических, геохимических и геофизических данных по активизации, происходящей на наших глазах. Нами показано, что главным активным элементом в современной Земле должна быть постоянно движущаяся снизу вверх маломощная зона кристаллизации, расположенная между полностью затвердевшей частью ядра (твердое внутреннее ядро) и его еще полностью жидкой частью (внешнее жидкое ядро). Именно с этой зоной связаны разнообразные фазовые переходы в охлаждающемся расплаве при прохождении им точек бифуркации. Там происходят фазовые переходы как типа смены выделяющихся твердых фаз, которые наращивают внутреннее ядро, так и ретроградного кипения с образованием капель “ядерных” флюидов. Показано, что эти капли всплывают в высокожелезистом расплаве-хозяине и накапливаются в основании мантии. Там они участвуют в формировании мантийных плюмов, главных переносчиков глубинных импульсов во внешние геосферы, и вместе с ними окончательно покидают ядро. Предполагается, что в одной из таких точек произошло резкое падение растворимости флюидов в охлаждающейся высокожелезистой жидкости внешнего ядра. Это должно было привести к одновременной интенсификации ретроградного кипения этого расплава по всей поверхности зоны кристаллизации ядра, т.е. в глобальном масштабе. Это и могло обеспечить поступление избытка “ядерных” флюидов, необходимых для массового образования мантийных плюмов и послужить триггером для процессов Позднекайнозойской глобальной тектономагматической активизации Земли.

Ключевые слова: активизация тектономагматических процессов, затвердевание ядра, внешнее (жидкое) и внутреннее (твердое) ядра Земли, высокожелезистая жидкость, точки бифуркации, ретроградное кипение, глубинные флюиды, мантийные плюмы, глобальная петрология

DOI: 10.31857/S0203030623700190, **EDN:** WQOFHU

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших событий новейшей истории Земли является глобальная позднекайнозойская (неоген-четвертичная) активизация тектономагматических процессов, начавшаяся примерно 30 млн лет назад, в середине миоцена, и продолжающаяся в настоящее время [Stille, 1924;

Хаин, 1973; Шарков, Богатилов, 1987; Dineley, 2000; Potter, Szatmari, 2009 и др.]. Эта активизация охватила практически весь земной шар и выразилась в резком усилении и/или возобновлении тектономагматических процессов, часто существенно меняя ситуацию в верхних геосферах нашей планеты. Именно тогда начались согласованные, не связанные, на первый взгляд, друг с

другом различные глобальные события, которые установили современный мир. Тогда оформились два глобальных орогенных пояса (Евразийский — от Испании до Вьетнама и Андо-Кордильерский — вдоль западных окраин обеих Америк), а вдоль восточной окраины Азии образовались системы вулканических дуг и задуговых морей. Одновременно с этими событиями понижались глобальные температуры в океане и атмосфере, опустынивание распространялось из Центральной Азии на север Африки, в Австралию и на юг Южной Америки. Тогда же, вместе с экспансией Арктического и Антарктического ледовых щитов, происходила инициальная глубоководная эрозия, менялся состав осадков и т.д. [Potter, Szatmari, 2009].

При этом резко усилилась интенсивность внутриплитного магматизма: на континентах и в океанах, от Арктики до Антарктики, появилось множество вулканических ареалов этого магматизма (рис. 1), большинство из которых действует и поныне [Шарков, Богатилов, 1987], включая крупные изверженные провинции [Ernst, 2014]. Поскольку такой магматизм связан с подъемом мантийных плюмов, это свидетельствует о широком участии в рассматриваемой активизации глубинных процессов во внутренних геосферах Земли.

Все это происходит буквально на наших глазах, выражаясь в морфологии поверхности Земли (неотектонике), вулканизме, геофизических полях и т.д., т.е. доступно всестороннему изучению геологическими, петрологическими, геохимическими и геофизическими методами. Большинство исследователей считает, что рассматриваемая активизация тектоносферы является только отражением глубинных событий, о чем свидетельствует ее глобальный характер и отсутствие каких-либо внешних причин для ее появления, однако ее природа так и остается неясной. Поэтому целью настоящей работы является вычленение на основе имеющихся современных геологических, петрологических, геохимических и геофизических данных главных причин и механизмов осуществления этой активизации.

Прежде чем перейти к обсуждению проблемы позднекайнозойской активизации Земли, необходимо напомнить, что она развивалась неравномерно. Как было показано ранее, и в середине палеопротерозоя, ~2.3 млрд лет назад, произошел кардинальный необратимый перелом в характере тектономагматических процессов (Главная геологическая катастрофа), разделивший историю Земли на две примерно равные части: раннюю (протогей, или нуклеарную стадию), и зрелую (неогей, или континентально-океаническую стадию), продолжающуюся и поныне [Stille, 1924; Богатилов и др., 2010; Шарков и др., 2020]. В процессе катастрофы деплетированные высоко-Mg расплавы протогея (коматититы, бонинитоподоб-

ные магмы и др.) резко сменились преимущественно геохимически-обогащенными толеитовыми базальтами неогей с повышенными содержаниями Fe и Ti, а плюм-текtonика протогея — плейт-текtonикой неогей. Все это свидетельствует о существовании двух главных стадий развития нашей планеты, каждая из которых стабильно функционировала в своем собственном режиме на протяжении более 2 млрд лет. Таким образом, рассматриваемая ниже активизация является только одним из эпизодов второй стадии развития Земли, и описанные ниже процессы и механизмы относятся именно к ней. При этом современная Земля имеет ряд особенностей строения, которые не всегда учитываются при глобальных построениях и о которых необходимо напомнить.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗЕМЛИ

Согласно сейсмическим данным, главными элементами ее строения являются земная кора, мантия и ядро.

Земная кора подразделяется на два принципиально разных типа: континентальную и океаническую. *Континентальная кора* средней мощностью 35–40 км, в свою очередь, подразделяется на две примерно равные части: верхнюю сиалическую и нижнюю — мафическую. Основой верхней коры континентов являются весьма однообразные архейские гранитоиднейсы тоналит-трондьемит-гранодиоритового состава, которые, скорее всего, представляют собой остатки переработанной более поздними процессами первичной земной коры [Богатилов и др., 2010]. Нижняя континентальная кора сложена в основном, гранатовыми гранулитами и эклогитами, образовавшимися при метаморфизме базальтов и габброидов. В настоящее время считается, что нижняя кора имеет независимое от верхней происхождение и формировалась путем андерплейтинга, т.е. внедрения базальтовой магмы между верхней корой и мантией, особенно при образовании крупных изверженных провинций [Rudnick, Gao, 2003].

Океаническая кора, в отличие от континентальной, имеет мощность порядка всего 6–7 км. Она образована преимущественно базальтами и габброидами и практически не содержит гранитного материала, тем более его самостоятельного слоя. На долю гранитов здесь приходится не более 5%, и они представлены преимущественно плагиогранитами (трондьемитами).

Мантия составляет примерно 83% объема Земли (без атмосферы), а ее доля массы от всей массы Земли достигает 67% [Kaminsky, 2017]. Она образована преимущественно ультрамафитами с подчиненным количеством мафитов. По сейсмическим данным, мантия подразделяется на верх-

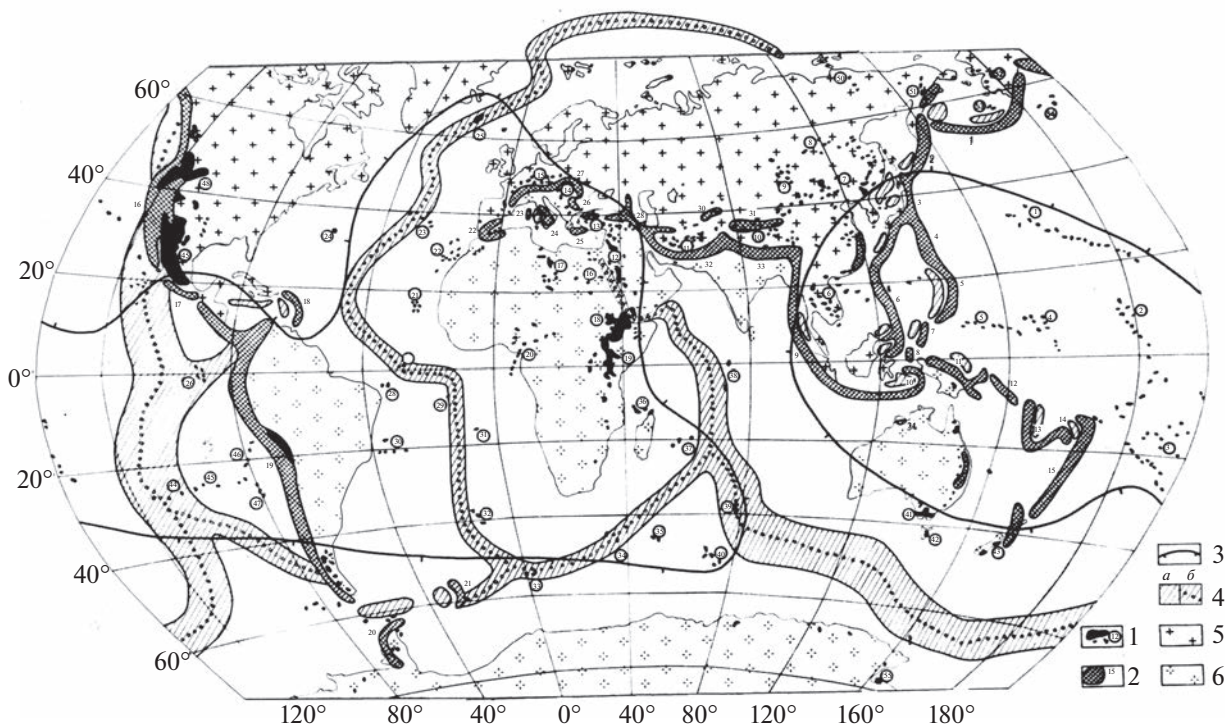


Рис. 1. Схема размещения позднекайнозойского магматизма Земли [Шарков, Богатиков, 1987].

1 — главные ареалы внутриплитного магматизма (Fe—Ti пикриты и базальты, K—Na и K умеренно- и высокощелочные серии): (1) Гавайский, (2) Лайн, (3) Таумоту—Сообщества-Табуаи, (4) Маршалловый, (5) Каролинский, (6) Индокитайский, (7) Дальневосточный, (8) Байкальский, (9) Монгольский, (10) Тибетско-Наньшанский, (11) Ирано-Афганский, (12) Аравийский, (13) Малоазиатский, (14) Паннонский, (15) Центрально-Европейский, (16) Западно-Красноморский, (17) Северо-Африканский (Ахаггар, Тибести), (18) Эфиопский, (19) Кенийский, (20) Камерунский, (21) Зеленого Мыса, (22) Канарский, (23) Азорский, (24) Бермудский, (25) Исландский, (26) Галапагосский, 27 — Сан-Паулу, 28 — Фернанду-ди-Норонья, 29 — Вознесения, 30 — Тринидади, (31) Св. Елены, (32) Тристан-да-Кунья, Гоф, (33) Буве, (34) Принс-Эдуард, (35) Крозе, (36) Коморско-Мадагаскарский, (37) Маскаренский (Реюньон, Маврикий), (38) Мальдивский, (39) Амстердам и Сент-Поль, (40) Кергеленский, (41) Южно-Австралийский (Виктория), (42) Тасманский, (43) Южно-Новозеландский, (44) Пасхи, (45) Сала-и-Гомес, (46) Наска, (47) Хуан-Фернандес, (48) Запада США, (49) провинция Бассейнов и Хребтов, (50) Индигирский, (51) Чукотский, (52) Аляскинский, (53) Прибыловский, (54) Аляскинского залива, (55) Эребус (Антарктида); 2 — главные ареалы (дуги) андезит—латитового магматизма конвергентных окраин континентов и микроплит (преимущественно известково-щелочная серия, а также низкотитанистые и умеренно-щелочные серии): (1) Алеутско-Аляскинская, (2) Курило-Камчатская, (3) Японская, (4) Изу-Бонинская, (5) Марианская, (6) Филиппинская-Сулавеси, (7) Каролинская, (8) Молуккская, (9) Индонезийско-Бирманская, (10) Банда, (11) Новогвинейская и Новобританская, (12) Соломонова, (13) Новогвинеидская, (14) Фиджийская, (15) Тонга-Кермадекская, (16) Западно-Североамериканская, (17) Трансмексиканская, (19) Малоангильская, (19) Западно-Южноамериканская, (20) Антарктического полуострова, (21) Южно-Сандвичева, (22) Альборанская, (23) Сардинская, (24) Южноитальянская, (25) Эгейская, (26) Балканская, (27) Карпатская, (28) Кавказско-Анатолийская, (29) Эльбурская, (30) Памиро—Тяньшаньская, (31) Куэньлунская, (32) Южно-Афганская, (33) Гималайская; 3 — подъемы геоида; 4 — базальты спрединговых зон (a — задуговые бассейны, б — срединно-океанические хребты); 5 — фрагменты Лавразии; 6 — фрагменты Гондваны.

нюю (от подошвы коры до сейсмического раздела на глубине 410 км), затем — промежуточную (до раздела на глубине 660 км), и далее — нижнюю, продолжающуюся вплоть до границы с ядром на глубине 2900 км.

На долю *нижней мантии* приходится около 56% общего объема Земли [Kaminsky, 2017]. Там развиты преимущественно сверхвысокобарические минералы: майджорит, перовскит, ферропериклаз, бридгманит, Ca-Si перовскит, алмаз и другие вплоть до ассоциации пост-перовскит + ферропериклаз в слое D” на границе с ядром. Все

эти минералы являются преимущественно оксидными фазами, и Земля ниже уровня 660 км из силикатной становится оксидной [Kaminsky, 2017].

Среди пород нижней мантии он выделяет три минеральных ассоциации: ультрамафическую, карбонатитовую и мафическую, (отличающуюся от ультрамафической наличием зерен кремнезема и Al-содержащих фаз), связанную с редкими субдукционными слэбами, которые пересекают сейсмическую границу 660 км, а также карбонатитовую.

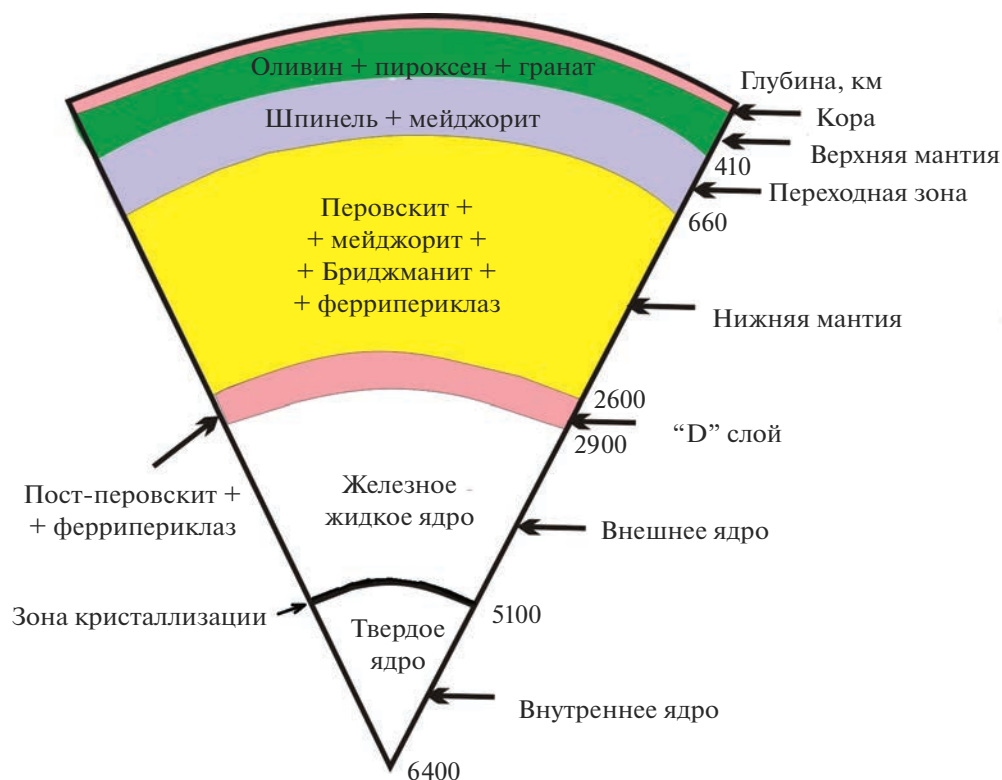


Рис. 2. Упрощенный поперечный разрез Земли.

Главные минеральные компоненты мантии меняются от оливин + пироксен + гранат (или богатая Al шпинель) в верхней мантии, к шпинель + мейджорит в промежуточной зоне, перовскит + феррипериклаз в нижней мантии до пост-перовскита + ферропериклаза в слое "D". Границы между слоями поведены по главным сейсмическим разделам [Nérose, Lay, 2008; Kaminsky, 2017].

Шарообразное **ядро** Земли, согласно сейсмическим данным, расположено на глубинах от ~2900 км до ее центра (~6400 км) и состоит из внешнего жидкого и внутреннего твердого ядра (рис. 2). На долю ядра приходится около трети массы всей Земли. При этом температура в основании мантии составляет ~2900°C, а на границе внешнего и внутреннего ядра достигает ~3500–4500°C [McDonough, 2014].

Сейсмические данные свидетельствуют о том, что граница между мантией и внешним жидким ядром Земли (СМВ) характеризуется резким скачком плотности. Из этого следует, что никакое мантийное вещество, кроме водорода, проникнуть в ядро не может [Shibasaki et al., 2009]. Соответственно, вещество ядра является практически недоступным для внешних воздействий, но характеризуется постоянным оттоком тепла и флюидных компонентов [Kaminsky, 2017].

Прямые сведения о составе земного ядра отсутствуют. Тем не менее, данные экспериментов по ударному сжатию металлов и их соединений позволяют с высокой степенью вероятности считать, что земное ядро на 90% образовано железом [Альтшулер и др., 1968]. При этом ядро не может

состоять только из чистого железа или, тем более, из его смеси с никелем, поскольку плотность железа и никелистого железа метеоритного состава при давлениях, господствующих в земном ядре, приблизительно на 10–15% выше плотности реального вещества внешнего ядра Земли, что требует добавок более легких компонентов [Сорохтин, 2007; Rubie et al., 2009]. По мнению [Allegre et al., 1995; McDonough, 2014], наиболее вероятными кандидатами здесь являются такие распространенные в Земле элементы как S и O, а также Si, Mn, Cr, Co, Ni, C и P. Мы полагаем, что определенную роль в составе современного внешнего жидкого ядра Земли могут играть также Ti, щелочи и некоторые другие несовместимые элементы (см. ниже).

В связи с этим обращают на себя внимание необычные свойства природной высокожелезистой жидкости, выявленные при изучении коронитовых структур в феррогабброидах ультрамафит-габбро-сиенитового Еletzозерского интрузива в Северной Карелии (Россия), который произошел за счет Fe-Ti пикробазальтов среднепалеопротерозойской Ятулийско-Людиловской крупной изверженной провинции [Шарков, Чистяков,

2017а, 2017б]. Эти концентрически-зональные короны, образованные в основном амфиболом (керсутитом), слюдой (биотитом) и оливином, возникали вокруг затвердевающих капель высоко-Fe жидкости. Судя по составу корон, содержание растворенных в этой жидкости компонентов (Si, Ti, Al, Mg, Ca, Na и K, а также воды, Cl и F) могло достигать 10–15 мас. %. Как будет показано ниже, аналогичная ситуация с растворимостью подобных компонентов в высокожелезистой жидкости земного ядра действительно имеет место и играет важную роль в происходящих там процессах.

Верхняя граница *твердого внутреннего ядра*, составляющего около 6% массы и 5% объема всего земного ядра, расположена на глубине 5080 км. Предполагается, что твердое внутреннее ядро сложено Fe-Ni сплавом, близким по составу к железным метеоритам, возможно, с добавками кремнезема и алмаза. При этом строение внутреннего ядра не является однородным. Специальными исследованиями во внутреннем ядре установлено наличие композиционной стратификации [Labrosse, 2014], что роднит внутреннее ядро с такими продуктами затвердевания крупных объемов силикатных расплавов как расслоенные интрузивы (см. ниже). Кроме того, важным недавним достижением было открытие в центре современного твердого ядра остатков более древнего твердого ядра с независимой структурой, которое является его старейшей частью [Wang et al., 2015]. На наш взгляд, это реликты первичного железного ядра Земли, одно из свидетельств вторичного происхождения современного ядра [Sharkov, 2012; Шарков и др., 2020].

Согласно расчетам S. Labrosse и ее коллег [2001], основанных на общефизическом законе сохранения энергии, внутреннее ядро Земли возникло не ранее 2.5 млрд лет назад и не позже 1.0 млрд лет, скорее всего 2.0–1.7 млрд лет назад. С этим в общих чертах согласуются и палеомагнитные данные, правда, указывающие на более молодой возраст формирования твердого ядра — 1.0–1.5 млрд лет назад [Biggin et al., 2015]. Все это хорошо согласуется с представлениями о молодом возрасте жидкого ядра Земли и связанных с ним глубинных процессах, контролирующих, в частности, рассматриваемую активизацию. Вероятно, эти различия в оценке возраста внутреннего ядра связаны с разными подходами к определению данной величины. В первом случае речь идет, скорее всего, о зарождении твердого внутреннего ядра, а во втором — о влиянии уже разросшегося твердого ядра на палеомагнитную ситуацию.

Охлаждение и затвердевание земного ядра

Мантийные плюмы постоянно уносят из земного ядра тепло и флюиды, что неизбежно долж-

но приводить к его охлаждению и кристаллизации. В общем плане затвердевание ядра Земли — индифферентного шарообразного расплавленного тела — можно сопоставить с затвердеванием расплавленных планет. Как было показано еще [Jeffries, 1959], два независимых фактора контролируют их затвердевание (жидкого ядра в рассматриваемом случае): а) адиабатический градиент (минимальная разница в температуре для начала конвекции) и б) градиент температуры плавления (наклон линии ликвидуса в P – T координатах). Поскольку адиабатический градиент значительно ниже градиента температуры плавления, основной объем расплава остается перегретым относительно температуры ликвидуса, и затвердевание расплавленных планет должно происходить постепенно снизу вверх, т.е. от их центров к поверхности.

Эта теоретическая модель хорошо согласуется с результатами детального изучения крупных расслоенных интрузивов (крупных отливок природных расплавов в толще земной коры), которые наглядно показывают, как это реально происходит в природе [Уэйджер, Браун, 1970; Jackson, 1961; Шарков, 2006 и др.]. Показано, что в каждый данный момент кристаллизация возможна только у временного дна интрузивной камеры, где располагается маломощная (обычно несколько метров толщиной) зона кристаллизации, которая непрерывно движется вверх (рис. 3). Она в основном состоит из наиболее высокотемпературных (ликвидусных) кристаллических фаз (минералов кумулуса).

По мере охлаждения интрузивной камеры зона кристаллизации неуклонно движется снизу вверх, погребая под собой ранее выделившиеся кристаллические фазы и оставляя за собой затвердевшую часть интрузива (кумуляты, см. рис. 3). Тем самым из исходного расплава постоянно выводятся его наиболее высокотемпературные компоненты, а сам остающийся расплав обогащается низкотемпературными составляющими. В результате расплав, следуя по котектикам соответствующих физико-химических систем, попадает в точки бифуркации на тренде эволюции охлаждающейся жидкости, где происходят скачкообразные изменения свойств этой жидкости и, как следствие, фазовые переходы (смена выделяющихся минеральных фаз на более низкотемпературные, что и приводит появлению первичной магматической расслоенности [Шарков, 2006] или изменения растворимости флюидных компонентов в расплаве, вызывающие его ретроградное кипение). Таким образом, формирование расслоенности (стратификации) и ретроградное кипение являются результатом естественного хода событий при направленном затвердевании крупных объемов расплава и не несут никакой другой информации.

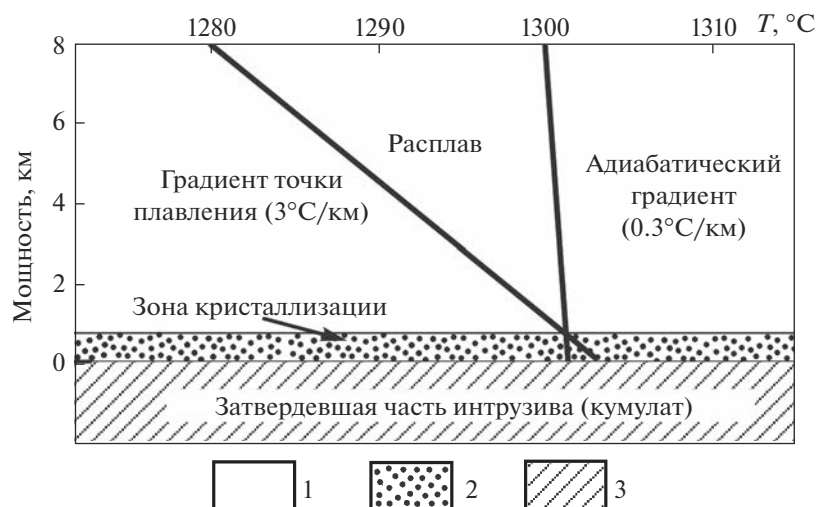


Рис. 3. Схема строения затвердевающего крупного расслоенного интрузива, по [Шарков, 2006].
1 — главный объем расплава; 2 — зона кристаллизации; 3 — затвердевшая часть интрузива (силикатные кумулаты).

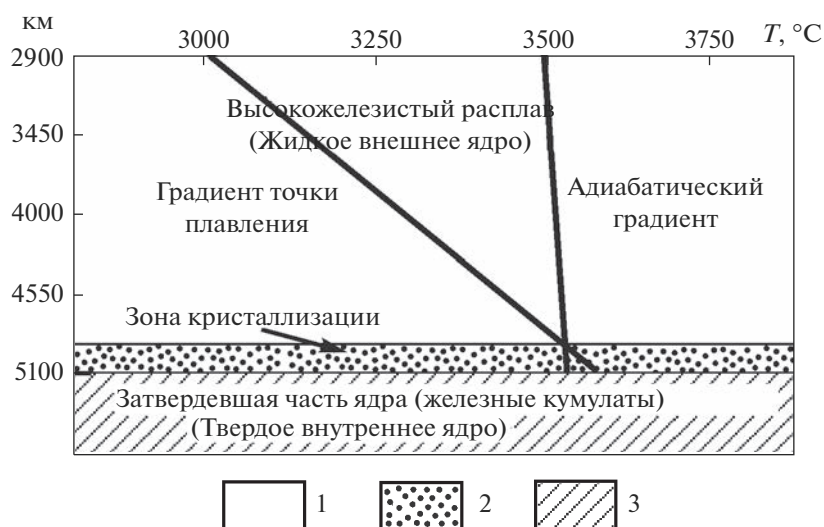


Рис. 4. Схема строения затвердевающего железного ядра Земли.
1 — главный объем высокожелезистого расплава (внешнее жидкое ядро); 2 — зона кристаллизации ядра; 3 — затвердевшая часть ядра (внутреннее твердое ядро).

Рассмотрим с таких позиций ситуацию с современным земным ядром. Очевидно, что затвердевание шарообразного жидкого ядра должно начаться в его центре с появления и центробежного разрастания твердого внутреннего ядра, окруженного зоной кристаллизации, но общая картина должна быть сходной (рис. 4). Из того факта, что зона кристаллизации земного ядра еще пока не установлена сейсмическими методами следует, что она имеет незначительную мощность (возможно даже как в интрузивах, в несколько метров), и что ее просто не искали.

Из всего этого следует, что строение современного ядра согласуется с обсужденной выше мо-

делью и является результатом продолжающегося процесса затвердевания первоначально жидкого ядра Земли от его центра к периферии. Это хорошо согласуется с расслоенной (стратифицированной) структурой твердого внутреннего ядра, напоминающей строение упомянутых выше расслоенных интрузивов, и предполагает наличие между внутренним и внешними частями постоянно движущейся вверх маломощной зоны кристаллизации, образующей временное дно жидкой (внешней) части ядра. Там, наподобие кумулатов в расслоенных интрузивах, на фронте начала затвердевания должно происходить выделение кристаллических твердых фаз железа, постепенно на-

ращивающих твердое внутреннее ядро. Температура ликвидуса современной высокожелезистой жидкости внешнего ядра сейчас точно неизвестна, но о ней можно судить по температуре на границе раздела жидкое—твердое ядро на глубине 5080 км (см. выше). Там она по разным оценкам составляет от 3500°C до 4500°C [McDonough, 2014]. Нигде не указана мощность внешнего и внутреннего ядра!

Сходный механизм направленного затвердевания был недавно предложен для объяснения затвердевания железных ядер планетезималей [Scheinberg et al., 2016].

Однако для целей данной работы этот твердо-фазовый переход существенной роли не играет, т.к. не нарушает динамику недр в отличие от скачкообразного снижения растворимости флюидных компонентов в одной из точек бифуркации, проходимых охлаждающимся высокожелезистым расплавом жидкой части ядра, приводя к его ретроградному кипению. Поскольку растворимость компонентов в расплавах увеличивается с возрастанием температуры и давления [Ландсберг, 2018] это должно приводить к выделению капель насыщенных высокоплотных флюидов, похожих скорее на расплавы/флюиды. Однако они все же легче расплава-хозяина, и должны всплывать в гравитационном поле Земли, достигая подошвы мантии. Они усиливают термальную конвекцию в жидком железном внешнем ядре и способствуют быстрому достижению этими флюидами подошвы мантии.

Таким образом, в отличие от интрузивов, где по мере их фракционной кристаллизации остаточный силикатный расплав накапливался в остающемся расплаве, постепенно меняя его состав, то в случае земного ядра этого не происходит. Если бы ситуация в затвердевающем ядре развивалась по этому сценарию, мы имели бы закономерно меняющийся во времени состав жидкого ядра и, соответственно, мантийных плюмов, генерирующих крупные изверженные провинции. Однако этого не происходит.

Как показало изучение эволюции КИП в истории Земли, состав внутриплитных магм на протяжении последних 2.3 млрд лет практически не менялся [Sharkov, Bogina, 2019; Шарков и др., 2020]. Это значит, что не менялся и состав флюидов, обеспечивавших образование мантийных плюмов. Возникающий в процессе кристаллизации жидкого ядра избыток этих флюидных фаз проходит транзитом через насыщенную ими еще жидкую часть ядра, накапливается в основании мантии и покидает внутренние геосферы вместе с новообразованными мантийными плюмами, не участвуя в дальнейших процессах затвердевания ядра. Именно эта конкретная особенность затвердевания высоко-Fe жидкости и обеспечивает

удивительную стабильность состава термохимических мантийных плюмов начиная с середины палеопротерозоя. Как же образуются современные мантийные плюмы, транслирующие глубинные импульсы во внешние оболочки Земли?

СОВРЕМЕННЫЕ МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ

Согласно сейсмическим данным, мантийные плюмы представляют собой вертикально ориентированные структуры с раздувами как внизу, где размещаются области их питания, так и наверху, где материал плюмов растекается, достигнув уровня своей плавучести [Nataf, 2000]. Там и происходит адиабатическое декомпрессионное плавление головных частей этих плюмов с образованием крупных изверженных провинций [Ernst, 2014]. Обычно это толеитовые базальты с подчиненным количеством умеренно-щелочных Fe-Ti базальтов типа OIB (oceanic island basalts) [Ernst, 2014]. Однако в рассматриваемом случае позднекайнозойской активации во всех этих практически одновременно сформированных ареалах скорее преобладают щелочные базальты, что все же может указывать на некоторую эволюцию состава внешнего жидкого ядра. Все ареалы близки по вещественному составу, что свидетельствует как об их связи с аналогичными же по составу мантийными плюмами, так и об отсутствии каких-либо случайностей (стечения обстоятельств) в их происхождении.

Как уже говорилось, согласно современным моделям, формирование мантийных плюмов имеет место на границе жидкого железного ядра и мантии. Особый интерес в этом плане представляет слой “D” мощностью 100–150 км, расположенный как раз на этой границе (см. рис. 2). Именно там осуществляется пропитка пород низов мантии горячими (“ядерными”) флюидами, приводящая к их разогреву и разуплотнению, и где в конечном счете и зарождаются эти сквозь-мантийные тепломассопотоки.

Что мы знаем о конкретном веществе современных мантийных плюмов? Очень важная информация об этом содержится в мантийных ксенолитах в неоген-четвертичных базальтах КИП. Как уже указывалось выше, они участвуют в рассматриваемой глобальной активизации и распространены по всему миру на континентах и в океанах, от Арктики до Антарктики (см. рис. 1). Эти ксенолиты, равно как и содержащие их базальты, везде близки по вещественному составу, что, повидимому, свидетельствует об их едином источнике — слое “D” (см. выше). Мы полагаем, что эти ксенолиты являются фрагментами верхних охлажденных краев мантийных плюмов над зонами их адиабатического декомпрессионного плавления [Sharkov et al., 2017].

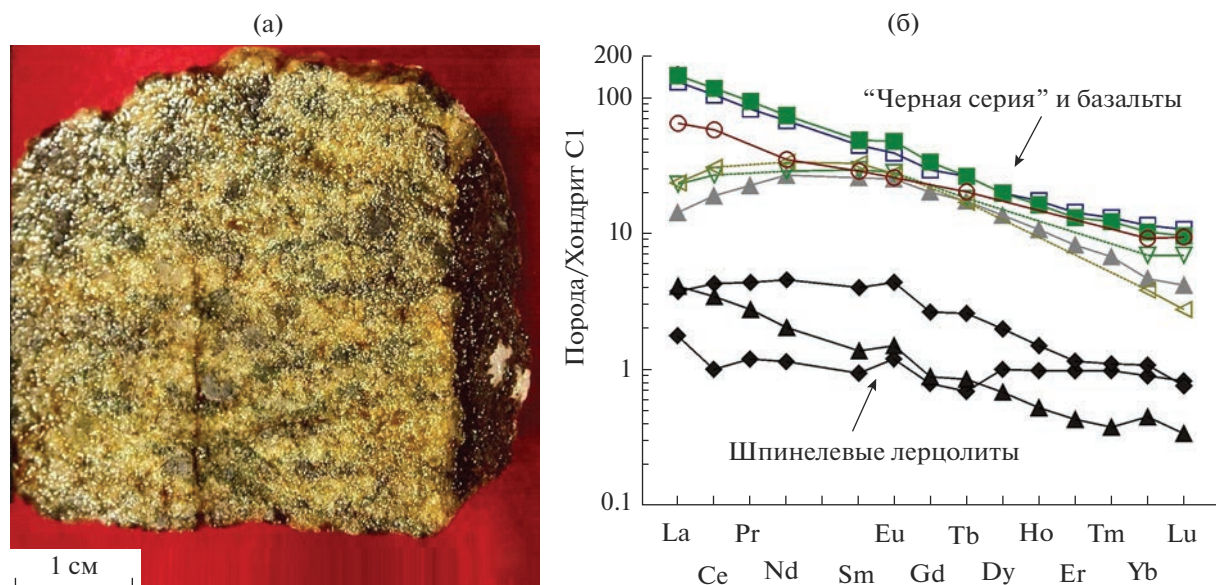


Рис. 5. Мантийный ксенолит из базальта (фото Н. Downes): зеленый шпинелевый лерцолит с жилой черной серии справа (а) и содержания РЗЭ в обоих типах плюмового вещества (б, по [Sharkov et al., 2017]).

Все исследователи признают существование здесь двух главных типов мантийных ксенолитов (рис. 5): 1) зеленых шпинелевых перидотитов (преимущественно лерцолитов), по-видимому, представляющих собой мантийный матрикс плюмов, и 2) жильных пород “черной серии”, которые образованы клинопироксеном (Al-Ti авгитом), керсутитом, флогопитом, ильменитом и т.д. [Ионов, 1988; Pearson et al., 2014 и др.]. Иногда, хоть и редко, вместо жил “черной серии” наблюдаются жилы карбонатитов, играющие в таких случаях роль этой серии [Ionov et al., 1996].

Очень вероятно, что первичный минеральный состав матрикса мантийных плюмов (зеленых шпинелевых перидотитов) претерпел значительную трансформацию при подъеме плюма, так как парагенезис минералов из нижнемантийных протолитов должен был характеризоваться преобладанием оксидоподобных разновидностей (бриджманит, перовскит, постперовскит, кремнезем, Al-фазы, карбоната и др. [Kaminsky, 2017]. При этом наличие ортопироксена в умеренно-глубинных силикатных верхнемантийных породах, по-видимому, может свидетельствовать о повышенных в целом содержаниях кремнезема в их нижнемантийных протолитах. Кроме того, геохимическое изучение мантийных ксенолитов в базальтах показало, что содержание несовместимых элементов в шпинелевых лерцолитах матрицы мантийных плюмов очень низкое в отличие от пород “черной серии” и базальтов-хозяинов (см. рис. 5б).

Судя по имеющимся данным, декомпрессионное плавление головных частей современных

мантийных плюмов осуществляется, по крайней мере, в две стадии [Шарков, Богатиков, 2019 и др.]. На первой, главной, происходит массовое адиабатическое плавление их вещества, часто приводящее к появлению крупных изверженных провинций. Оно завершается в результате прогрессирующего охлаждения головных частей мантийных плюмов и, после некоторого перерыва, связанного с накоплением флюидов, наступает флюидо-зависимая стадия, когда уже затвердевшие, но еще горячие породы головы плюма подвергаются вдоль трещин метасоматической проработке флюидами. Это приводит к снижению температуры их солидуса, и, соответственно, к возобновлению процесса его плавления материала плюма с образованием уже расплавов/флюидов “черной серии” [Downes, 2001; Ma et al., 2015 и др.]. При этом кристаллизация новообразованного расплава может происходить в условиях его ретроградного кипения на глубинах порядка 30 км и более, приводя к появлению “пузырчатых” мегакристов керсутита или клинопироксена [Шарков и др., 2022].

Следы такого флюидо-зависимого (вторичного) плавления нередко сохраняются в качестве “расплавных карманов” (melt-pockets), своеобразных “зародышей” плавления, установленных в ксенолитах шпинелевых перидотитов в базальтах [Ma et al., 2015 и др.]. Изучение таких “зародышей” показало, что они формировались при $T = 826\text{--}980^\circ\text{C}$ на глубинах 21–27 км (0.7–0.9 GPa) [Ionov et al., 1996; Downes, 2001; Ma et al., 2015 и др.]. Из этого следует, что верхний край головных частей мантийных плюмов мог достигать

весьма умеренных глубин — вплоть до 21 км, т.е. практически основания древней верхней сиалической земной коры. Как показало изучение ксенолитов, например, в неоген-четвертичных плато-базальтах Сирии, при этом породы более древней (мезозойской) нижней коры региона, образованные гранатовыми гранулитами, были смещены (заменены) более молодыми шпинелевыми лерцолитами при сохранении докембрийской верхней коры [Шарков, Богатиков, 2019]. При этом некоторые исследователи полагают, что такое рециклирование мантии происходило за последние 30 млн лет под всем Альпийско-Гималайским поясом [Dejan et al., 2013] или Северо-Китайским кратоном [Kusky et al., 2013]. Так что это скорее норма, чем исключение. Иными словами, старая литосферная мантия в процессе активизации в наиболее активных регионах, была заменена новой, привнесенной мантийными плюмами. При этом нередко сохраняется древняя верхняя сиалическая кора, маскируя происшедшие перемены. Но в процессе дальнейших движений кратоны все равно расчленяются на блоки, движущиеся в разных направлениях (см. рис. 1).

Глубинные флюиды. На многочисленных примерах декомпрессионного флюидо-зависимого плавления показано, что в нем участвовало два главных типа флюидов, хотя и в разных пропорциях: 1) легкоподвижный карбонатный (карбонатитовый) флюид, обогащенный LREE, Na, Th, U и деплетированный Si, Ti, Zr, Hf и др., 2) железистый силикатно-водный расплав/флюид, обогащенный Ti, Fe, Ba, P, K, Zr, Nb, Ta и др. [Downes et al., 2001; Ma et al., 2015; Ryabchikov et al., 2010 и др.]. Судя по “расплавным карманам”, соотношения между этими двумя типами флюидов непостоянны: расплавы “черной серии” были сформированы при преобладании железистого силикатно-водного флюида/расплава, тогда как карбонатитовые — карбонатного [Sharkov et al., 2017]. При этом, судя по тому, что практически они участвовали и в процессах раннего декомпрессионного адиабатического плавления голов мантийных плюмов.

Какова природа этих флюидов? Прежде всего, обращает на себя внимание существование в мантийных плюмах двух главных самостоятельных типов флюидов: карбонатитового и Fe-силикатно-водного, вероятно, имеющих разное происхождение. И если компоненты карбонатитового флюида представлены даже в нижней мантии, и их мантийный генезис особых сомнений не вызывает, то ситуация со вторым, доминирующим, типом флюидов не так очевидна. Большинство компонентов таких флюидов отсутствует в породах мантии и может быть связано происхождением только с жидким железным ядром.

Об этом может свидетельствовать Re-Os изотопия в породах мантийных плюмов неогей от 2.0 млрд лет назад до современности [Walker et al., 1997; Brandon et al., 1999; Puchtel et al., 1999 и др.]. Из последних публикаций на эту тему следует отметить работу по изотопии W, также подтверждающую участие компонентов ядра Земли в формировании мантийных плюмов фанерозоя [Rizo et al., 2019]. Поскольку связь с ядром могла осуществляться только через флюиды, это может подтвердить “ядерную” природу железо-силикатно-водного флюида.

Поскольку вещество современных мантийных плюмов состоит из мантийного матрикса и высокоплотных флюидов, можно думать, что кристаллизация высокожелезистой жидкости ядра происходила в условиях ретроградного кипения, наподобие кристаллизации вторичного флюидо-зависимого расплава “черной серии” в головах мантийных плюмов [Шарков и др., 2022].

Таким образом, мы полагаем, что ксенолиты зеленых шпинелевых перидотитов являются фрагментами нижнемантийного матрикса термохимических мантийных плюмов, трансформированного в условиях умеренных давлений верхней мантии. “Черная серия” мантийных ксенолитов произошла за счет флюида/расплава, образовавшегося в результате флюидо-зависимого плавления головных частей мантийных плюмов на заключительных стадиях существования связанных с этими плюмами магматических систем [Шарков и др., 2022]. Геохимические данные свидетельствуют о том, что несовместимые элементы содержатся в основном в железо-силикатно-водных флюидах, участвовавших в процессах декомпрессионного плавления голов мантийных плюмов.

Мы полагаем, что эти флюиды являются “вкладом” земного ядра в формирование мантийных плюмов. Иными словами, в зонах плавления магматических систем КИП (LIPs) присутствовали как деплетированный материал мантии, так и геохимически-обогащенное вещество ядра.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из имеющихся данных, Земля представляет собой охлаждающуюся планету с затвердевающим жидким железным ядром. Согласно общезначимому закону, при этом должна выделяться теплота кристаллизации, равная затраченной ранее теплоте плавления [Ландсберг, 2018]. По-видимому, эта теплота и обеспечивает энергией все происходящие в глубинах Земли и на ее поверхности динамические процессы. Такие эндогенные источники энергии как: радиоактивный распад, конвекция, фазовые переходы, гравитационное воздействие Солнца и Луны, согласно исследованиям, под руководством акаде-

мика Н.Л. Добрецова и частично опубликованным в монографии [Глубинная геодинамика, 2001], было показано, что эти процессы малоэффективны. В тоже время, затвердевающее жидкое ядро образует самостоятельную геосферу и генерирует огромное количество энергии и действительно может обеспечить современную геодинамику Земли. Другие источники энергии, существенной роли в геодинамике Земли не играют.

Выше было показано, что затвердевание высокожелезистой жидкости внешнего ядра происходит в зоне кристаллизации в условиях ретроградного кипения, наподобие кристаллизации вторичного флюидо-зависимого расплава “черной серии” в головах мантийных плюмов [Шарков и др., 2022]. Иными словами, в зоне кристаллизации ядра может происходить как наращивание твердого внутреннего железного ядра, так и флотация капель флюидной фазы, или оба процесса совместно. В отличие от твердой фазы, они постоянно удалялись из зоны кристаллизации (всплывали) и накапливались в основании мантии, в слое “D”, инициируя формирование мантийных плюмов.

Большинство исследователей связывает подъем мантийных плюмов с всплыванием разогретого пластичного материала глубинной мантии сквозь вышележащую литосферную мантию до уровня своей плавучести [Maruyama, 1994; Добрецов и др., 2001; Philpotts, Ague, 2009 и др.]. Но эти представления имеют в основном абстрактный характер и не учитывают ни вещественный состав самих плюмов, ни конкретный механизм их формирования и функционирования. Однако в последнее время появилось новое перспективное направление, связывающее возникновение мантийных плюмов с неустойчивостью Рэлея-Тейлора (Rayleigh-Taylor instability) [Young et al., 2001; Mishra, Srivastava, 2019; Ghosh et al., 2020].

Как известно, неустойчивость Рэлея-Тейлора возникает, когда происходит самопроизвольное нарастание возмущений давления, плотности и скорости в средах с неоднородной плотностью, находящихся в гравитационном поле Земли [Ландсберг, 2018]. В результате, любое возмущение поверхности раздела слоев разной плотности будет увеличиваться с течением времени, так как участки более плотной среды, оказавшиеся выше поверхности раздела, начинают тонуть в менее плотной среде, а участки менее плотной среды, оказавшиеся ниже поверхности раздела, начинают самопроизвольно всплывать (прорываться) через более плотную среду. Таким образом, не вдаваясь в подробности, можно заключить, что в разогретом основании мантии происходят самопроизвольные возрастания возмущений давления, плотности и скорости [Nataf, 2000]. В результате, любое возмущение поверхности раздела

слоев разной плотности будет расти с течением времени, когда участки менее плотной среды начинают самопроизвольно всплывать (прорываться) через более плотную среду [Ландсберг, 2018].

В рассматриваемом случае механизма образования мантийного плюма имеется в виду неустойчивость, возникающая на поверхности раздела плотной холодной литосферной мантии, которая залегает в неустойчивом равновесии на поверхности прилегающего к ядру разогретого и пропитанного глубинными флюидами менее плотного слоя “D”. В конечном итоге это и приводит к локальным прорывам более легкого материала наверх сквозь более плотную литосферную мантию, что и является триггером процесса зарождения и подъема сквозь-мантийных тепло-массопотоков — мантийных плюмов (рис. 6). Это является именно взрывообразным прорывом большого количества глубинного флюидонасыщенного материала практически сквозь всю 2900-километровую мантию, не достигая всего 20–30 км до поверхности Земли (см. выше).

Судя по геологическим данным, активность мантийных плюмов на этом не кончается, а часто может продолжаться в течение по крайней мере 30 млн лет [Ernst, 2014], т.к. путь к движению наверх уже “пробит”. На место удаленного материала слоя “D” сползет порция холодной литосферной мантии, которая прогреется и насытится флюидами, и ситуация через некоторое время восстановится. При этом, материал его головной части, достигнув уровня своей плавучести, начинает растекаться, формируя над собой КИП и освобождая место для подъема следующей порции такого же материала. Из этого следует, что мантийные плюмы, по-видимому, представляют собой своеобразные временные каналы, по которым осуществляется “перекачка” накопившихся избытков глубинного материала во внешние оболочки Земли.

Как уже говорилось, термохимические мантийные плюмы современного типа, судя по данным изучения эволюции КИП, появились только около 2.3 млрд лет назад [Богатиков и др., 2010]. Они заместили более высокотемпературные термические плюмы архейского типа, генерировавшие коматиитовые расплавы, и сейчас являются единственной разновидностью мантийных плюмов.

Возможная роль земного ядра в процессах глобальной активизации Земли

Как следует из приведенных данных, “ядерные” флюиды играют важную роль в составе вещества мантийных плюмов. Можно даже сказать, что количество мантийных плюмов, поставляющих во внешние оболочки Земли энергию и новый глубинный материал, необходимые для про-

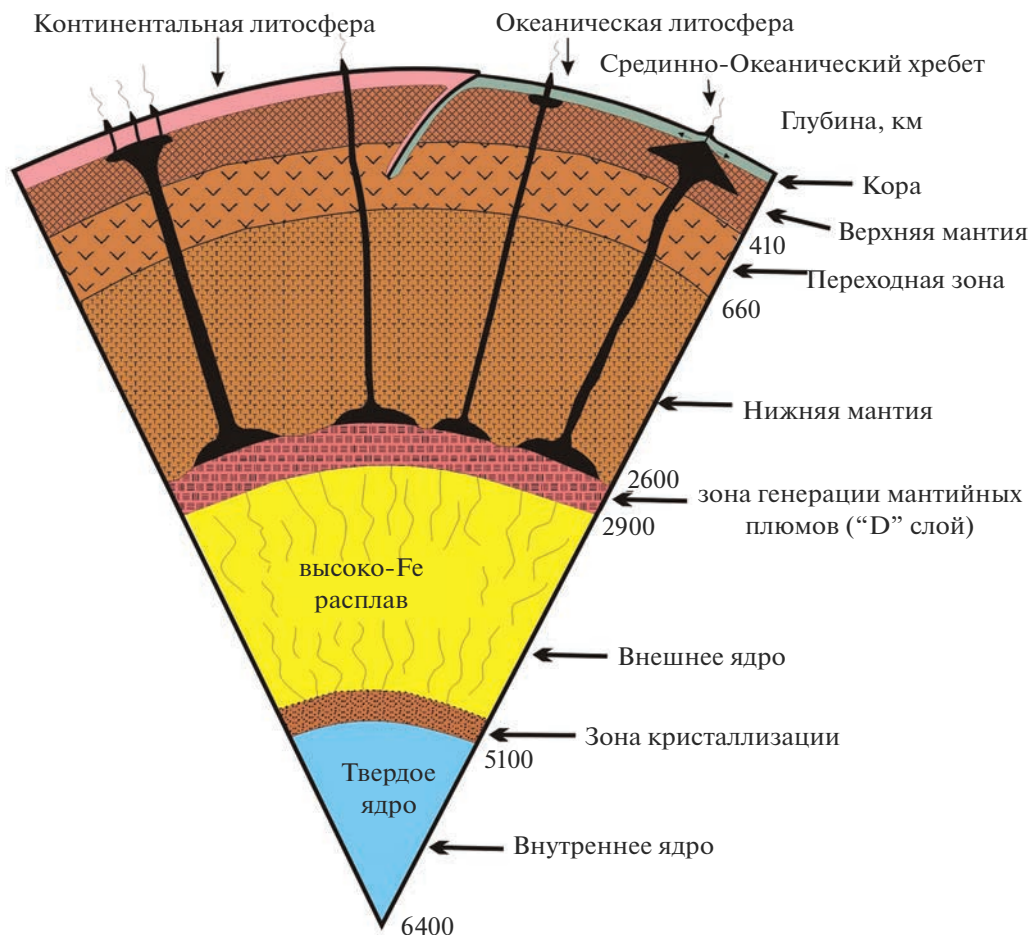


Рис. 6. Формирование термохимических мантийных плюмов.

текающих там тектономагматических процессов, в конечном счете зависит от масштабов флюидообразования в зоне кристаллизации ядра. Оно может резко возрастать при прохождении охлаждающимся расплавом точек бифуркации, где происходит скачкообразное снижение растворимости флюидов, стимулирующих образование мантийных плюмов, приводя к глобальной активизации тектогенеза.

Головные части мантийных плюмов растекаются во внешних оболочках Земли, приводя к появлению там большого количества нового чужеродного материала и сопровождаются мощными механическими напряжениями. Это и приводит к приоритету горизонтального перемещения материала, обычно описываемому в терминах плит-тектоники. В результате там возникают обширные зоны складчато-разрывных деформаций (орогены) типа Альпийско-Гималайского пояса. Как уже говорилось, при этом происходит замена старой литосферы под кратонами на новую, что в конечном счете приводит к разрывам земной коры и фор-

мированию новых литосферных блоков (плит), движущихся в разных направлениях (см. рис. 1) или, наоборот, собираясь вместе в форме суперконтинентов или пангей. Появляются области океанического спрединга, а также зоны нисходящих течений корового материала в мантию (зоны субдукции).

Все это сопровождается разнообразными магматическими процессами, преимущественно связанными с декомпрессионным плавлением глубинного материала головных частей мантийных плюмов (КИП, преимущественно толеитовые Fe-Ti базальты, реже OIB, а также MORB в океанах). Кроме того, здесь широко представлены продукты кристаллизационной дифференциации этих расплавов и их взаимодействия с материалом земной коры, ее частичной ассимиляции, а также, собственно, коровыми расплавами. В результате магматизм орогенов характеризуется значительным разнообразием [Богатиков и др., 2010; Ciborowski et al., 2017 и др.]. Однако при всем

при этом приоритет остается за внутриплитным (плюмовым) магматизмом.

В рассматриваемом случае Позднекайнозойской глобальной активизации резко возросшая роль внутриплитного магматизма может свидетельствовать о том, что этот феномен был связан с массовым подъемом мантийных плюмов, обновившим как все тектономагматические процессы, так и побочные климатические явления типа оледенений, опустынивания, смены палеогеографических (экологических) обстановок, привел к важным переменам в биосфере и т.д. Что могло вызвать такое непредсказуемое возрастание масштабов развития мантийных плюмов, зарождающихся на границе жидкого ядра и мантии? С нашей точки зрения это, в первую очередь, свидетельствует о резком увеличении количества глубинных флюидов. При этом, собственно мантия играет здесь пассивную роль, а необходимые тепло и флюиды поступают из ядра. Из этого следует, что именно затвердевающее жидкое ядро являлось источником перемен.

Поскольку темпы оттока тепла контролируются скоростью охлаждения Земли, то существенные колебаний здесь вряд ли можно ожидать. Другое дело – растворимость флюидных компонентов в высоко-Fe жидкости внешнего ядра, при снижении которой возникает феномен ретроградного кипения [Ландсберг, 2018], приводящий к активному высвобождению флюидной фазы и установлению ее самостоятельной роли в динамических процессах во внутренней Земле.

Во-вторых, как известно, растворимость флюидов в расплаве зависит от PT -параметров, и может существенно измениться, проходя в процессе охлаждения через существующие точки экстремумов (бифуркаций) [Ландсберг, 2018]. Нам не известен ни состав высоко-Fe жидкости внешнего ядра, ни точный состав флюидных компонентов, ни их возможные точки бифуркации в области сверхвысоких давлений ядра. Остается предполагать, что они существуют, и одну из них высоко-Fe расплав внешнего ядра проходил в середине миоцена в процессе общего охлаждения Земли. Скачкообразное понижение растворимости флюидов в расплаве внешнего ядра должно было привести к их массовому выделению и, соответственно, к увеличению количества возникающих мантийных плюмов. По-видимому, это и предопределило появление феномена Позднекайнозойской глобальной тектономагматической активизации Земли. Судя по масштабам и длительности процесса, возможно, это начало нового орогенного цикла.

Таким образом, по нашему мнению, причиной глобальной неоген-четвертичной тектономагматической активизации Земли, скорее всего, было резкое падение растворимости флюидных компонентов в одной из точек бифуркации в зоне кристаллизации высоко-Fe жидкости ее внешнего ядра. Это сразу привело к резкому усилению масштабов ее ретроградного кипения по всей окружности этой зоны, облегающей уже затвердевшее внутренне ядро. Капли этих флюидов всплывали в более плотном расплаве внешнего ядра и в значительно большем количестве накапливались в основании мантии, способствуя образованию мантийных плюмов. Механизмом реализации этой активизации был массовый подъем термохимических мантийных плюмов. Из этого следует, что “энергетическим сердцем” современной Земли, по-видимому, является ее затвердевающее внешнее ядро, порождающее мантийные плюмы – генераторы тектономагматических процессов в ее верхних оболочках.

После окончательного затвердевания жидкого ядра эти процессы прекратятся, как это уже произошло на Луне, Венере, Марсе и, вероятно, на Меркурии [Шарков, Богатилов, 2010].

*Механизмы осуществления передачи импульсов
из внутренних геосфер во внешние на примере
Позднекайнозойской глобальной
активизации Земли*

Как уже говорилось, Земля представляет собой охлаждающееся тело с затвердевающим жидким железным ядром. Выделяющаяся при этом теплота кристаллизации (равная теплоте плавления), по-видимому, полностью обеспечивает все эндогенные процессы, включая и рассматриваемую активизацию. Как было показано выше, активизация зародилась спонтанно во внутренних геосферах и затем охватила и внешние оболочки. При этом оказалось, что глубинные процессы подчиняются тем же общезначимым и физико-химическим законам, оперирующим на умеренных глубинах, правда с поправками на экстремальные условия.

Первый импульс к зарождению активизации, как уже говорилось, скорее всего был связан с прохождением трендом кристаллизации охлаждающейся высоко-Fe жидкостью внешнего ядра точки бифуркации, где резко понизилась растворимость флюидных компонентов, приведя к ретроградному кипению расплава. Пузырьки флюида, образующиеся в зоне кристаллизации, всплывали к основанию мантии сквозь расплав-хозяин, пропитывали и разогревали его с образо-

ванием разуплотненного слоя “D”. В результате там, на границе с вышележащей холодной литосферной мантией, формировалась неустойчивость Рэлея-Тейлора, приводящая к накоплению напряжений и локальному прорыву разуплотненного материала из глубин мантии во внешние оболочки, что должно было привести к образованию мантийного плюма. Растекание головных частей плюмов должно приводить к появлению крупных горизонтальных перемещений материала, появлению орогенов со складчато-разрывной тектоникой и зон океанического спрединга, а также зон нисходящего в мантию течения вещества — зон субдукции. Все это сопровождается адиабатическим декомпрессионным плавлением внесенного плюмами глубинного материала. Таким образом, именно мантийные плюмы являются главными трансляторами глубинных импульсов во внешние оболочки Земли, и путь трансформации глубинных импульсов можно проследить достаточно уверенно.

Единственным компонентом, участвующим в процессе на всем его протяжении, являются флюиды, выделившиеся при ретроградном кипении охлаждающегося жидкого железного ядра, всплывающие к основанию мантии, пропитывая и разуплотняя его вплоть до появления состояния неустойчивости Рэлея-Тейлора на границе новообразованного слоя “D” и вышележащей холодной литосферой. Вместе с новообразованными мантийными плюмами они проникают во внешние оболочки Земли, участвуют в декомпрессионном плавлении их материала и затем, вместе с вулканитами поступают на поверхность Земли.

ВЫВОДЫ

1. Позднекайнозойская глобальная активизация тектономагматических процессов Земли, продолжающаяся и поныне, произошла неожиданно и не вытекала ни из предшествующей истории развития Земли, ни внешнего воздействия. Это предполагает, что причина ее появления связана с глубинными процессами, происходящими во внутренних геосферах нашей планеты.

2. Показано, что земное ядро представляет собой затвердевающую систему, где его уже затвердевшая часть образована твердым внутренним ядром, а еще не успевшая затвердеть — внешним жидким ядром. Между ними должна находиться постоянно движущаяся снизу вверх маломощная зона кристаллизации. Показано, что особенностью происходящих в ней процессов является то, что они имеют место в условиях ретроградного кипения высокожелезистой жидкости ядра. При

этом капли выделяющегося флюида всплывают под влиянием гравитации в расплаве-хозяине и накапливаются в основании мантии (слой “D”).

3. Это должно приводить к разогреву и разуплотнению вещества этого слоя и появлению неустойчивости Рэлея-Тейлора на его границе с вышележащей плотной холодной литосферной мантией и возникновению мантийных плюмов, передающих глубинные импульсы в верхние оболочки Земли. Это хорошо согласуется с современными моделями формирования таких плюмов, позволяя обсудить технологию этого процесса.

4. Показано, что вещество современных мантийных плюмов состоит из мантийного матрикса и высокоплотных флюидов, значительную часть которых имеет происхождение из ядра. Сделан вывод, что количество мантийных плюмов, контролирующих тектономагматическую активность Земли, напрямую зависит от количества этих флюидов.

5. Судя по резкому возрастанию роли внутрилитного (т.е. связанного с подъемом мантийных плюмов) магматизма, рассматриваемая активизация осуществлялась за счет увеличения масштабов подъема мантийных плюмов, зарождавшихся на границе жидкого ядра и мантии в результате проникновения в нее флюидов из ядра.

6. Судя по тому, что состав расплавов в крупных изверженных провинциях практически не изменился за последние 2.3 млрд лет [Ernst, 2014], не изменился и состав мантийных термохимических плюмов. Вероятно, это связано с тем, что роль остаточного расплава здесь играют флюиды. Они не накапливаются в жидком внешнем ядре, а проходят через него транзитом, проникают в вышележащую мантию, и покидают ядро вместе с новообразованными термохимическими мантийными плюмами. Соответственно, количество мантийных плюмов — главных движителей тектономагматических процессов, напрямую зависит от поступающих из ядра флюидов.

7. Предполагается, что в процессе необратимого охлаждения высоко-Fe жидкости внешнего ядра она проходит через точки бифуркации, где происходит заметное снижение растворимости в ней флюидов. Одна из таких точек, где произошло скачкообразное падение растворимости флюидных компонентов, и могла послужить триггером для процессов глобальной активизации Земли, обеспечив поступление флюидов из затвердевающего ядра. Это привело к массовому подъему термохимических мантийных плюмов, сопровождаемому мощной активизацией тектономагматических процессов во внешних геосферах.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания Лаборатории Петрографии ИГЕМ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою глубокую признательность Е.В. Кислову за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтшулер Л.В., Симаков Г.В., Трунин Р.Ф. К вопросу о химическом составе ядра Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. Т. 1. С. 3–6.
- Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. Связь во времени и в пространстве. М.: Наука, 2010. 605 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика / 2-е издание. Новосибирск: Наука-ГЕО, 2001. 409 с.
- Ионов Д.А. Глубинные включения ультрамафитов в базальтах // Магматические горные породы. Т. 5. Ультраосновные породы / Под ред. Е.Е. Лазько, Е.В. Шаркова. М.: Наука, 1988. С. 310–338.
- Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т. 1. Механика, теплота, молекулярная физика. М.: Физматлит, 2018. 612 с.
- Сорохтин О.Г. Жизнь Земли. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 450 с.
- Уэйджер Л.П., Браун Г. Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970. 552 с.
- Хаин В.Е. Общая геотектоника / Изд. 2. М.: Недра, 1973. 511 с.
- Шарков Е.В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М.: Научный мир, 2006. 364 с.
- Шарков Е.В., Богатиков О.А. Позднекайнозойская глобальная активизация геологических процессов Земли – тектономагматические аспекты // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 10. С. 3–21.
- Шарков Е.В., Богатиков О.А. Эволюция тектономагматических процессов Земли и Луны // Геотектоника. 2010. № 2. С. 3–22.
- Шарков Е.В., Богатиков О.А. Взаимодействие растекающейся головы мантийного плюма с древней литосферой: результаты изучения глубинных ксенолитов в базальтах и лампрофировых диатремах Западной Сирии // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 7. С. 899–915.
- Шарков Е.В., Богина М.М., Чистяков А.В., Злобин В.Л. Эволюция крупных изверженных провинций в истории Земли (на примере восточной части Балтийского щита) // Вулканология и сейсмология. 2020. № 5. С. 51–66.
- Шарков Е.В., Чистяков А.В. Коронарные структуры в феррогабброидах Ельтьозерского интрузивного комплекса (Северная Карелия, Россия) как свидетельство существования богатого Fe расплава. 1. Разновидности корон // Геохимия. 2017а. № 6. С. 513–526.
- Шарков Е.В., Чистяков А.В. Коронарные структуры в феррогабброидах Ельтьозерского интрузивного комплекса (Северная Карелия, Россия) как свидетельство существования богатого Fe расплава. 2. Происхождение высокожелезистой жидкости // Геохимия. 2017б. № 7. С. 609–617.
- Шарков Е.В., Богатиков О.А. Взаимодействие растекающейся головы мантийного плюма с древней литосферой: результаты изучения глубинных ксенолитов в базальтах и лампрофировых диатремах Западной Сирии // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 7. С. 899–915.
- Шарков Е.В., Прокофьев В.Ю., Чистяков А.В., Богина М.М., Горностаева Т.А. Мегакристи “пузырчатого” керсута в неоген-четвертичных вулканитах северо-западной Сирии: свидетельства кристаллизации в кипящем расплаве/флюиде // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 60–80.
- Allegre C.J., Poirier J.-P., Humler E., Hofmann A.W. The chemical composition of the Earth // Earth Planet. Sci. Lett. 1995. V. 134. P. 515–214.
- Biggin A.J., Piispa E.J., Pesonen L.J., Holme R., Paterson G.A., Veikkolainen T., Tauxe L. Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation // Nature. 2015. V. 526. P. 245–248.
- Brandon A.D., Norman M.D., Walker R.J., Morgan J.W. ¹⁸⁶Os–¹⁸⁷Os systematics of Hawaiian picrites // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 174. P. 25–42.
- Ciborowski T.J.R., Minifie M.J., Kerr A.C., Ernst R.E., Baragar B., Millar I.L. A mantle plume origin for the Palaeoproterozoic Circum-Superior Large Igneous Province // Precambrian Res. 2017. V. 294. P. 189–213.
- Dejan P., Jacob D.E., Foley S.F. Recycling plus: A new recipe for the formation of Alpine–Himalayan orogenic mantle lithosphere // Earth and Planet. Sci. Lett. 2013. V. 362. P. 187–197.
- Dineley D.L. Miocene / Eds P.L. Hancock, B.J. Skinner // Oxford Companion to the Earth. Oxford: Oxford University Press, 2000. P. 694–695.
- Downes H. Formation and modification of the shallow subcontinental lithospheric mantle: a review of geochemical evidence from ultramafic xenolith suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of Western and Central Europe // Journal of Petrology. 2001. V. 41. P. 233–250.
- Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014. 653 p.
- Ghosh D., Maiti G., Mandal N., Baruah A. Cold plumes initiated by Rayleigh–Taylor instabilities in subduction zones, and their characteristic volcanic distributions: the role of slab dip // American Geophysical Union. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JB019814>

- Hirose K., Lay T.* Discovery of post-perovskite and new views in the core-mantle boundary region // *Elements*. 2008. V. 4. № 3. P. 183–189.
- Ionov D.A., O'Reilly S.Y., Genshaft Y.S., Kopylova M.G.* Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: phase relationships, mineral compositions and trace-element residence // *Contrib. Miner. Petrol.* 1996. V. 125. № 4. P. 375–392.
- Jackson E.D.* Primary textures and mineral associations in the Ultramafic zone in the Stillwater complex, Montana // *US Geol. Surv. Prof. Paper* 358. 1961. 106 p.
- Jeffries H.* The Earth, its origin, history, and physical constitution. London: Cambridge Univ. Press, 1959.
- Kaminsky F.V.* The Earth's Lower Mantle. Composition and Structure. Springer, 2017. 331 p.
- Kusky T.M., Windley B.F., Zai M.-G.* Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen // *Geological Society, London, Special Publications*. 2007. V. 280. P. 1–34.
- Labrosse S.* Thermal and Compositional Stratification of the Inner Core / Abstract of AGU 2014 Fall Meeting, 15–19 December. San Francisco, USA, 2014. D131A-4257.
- Labrosse S., Poirier J.-P., Le Mouél J.-L.* On the age of the inner core // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 190. P. 111–123.
- Ma G.S.-K., Wang K.-L., Malpas J., Iizuka Y., Xenophontos C., Turkmani A.A., Chan G.H.-N., Usuki T., Chan Q.H.-S.* Melt-pockets and spongy clinopyroxenes in mantle xenoliths from the Plio-Quaternary Al Ghab volcanic field, NW Syria: implications for the metasomatic evolution of the lithosphere / Eds A. Khan, F. Deschamps // *The Earth's heterogeneous mantle*. Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 205–257.
- Maruyama S.* Plume tectonics // *J. Geol. Soc. Japan*. 1994. V. 100. № 1. P. 24–49.
- McDonough W.F.* Compositional Model for the Earth's Core // *Treatise on Geochemistry. The Mantle and Core*. V. 2. Elsevier, 2014. P. 559–576.
- Mishra S.K., Srivastava A. K.* The Evolution of Magnetic Rayleigh–Taylor Unstable Plumes and Hybrid KH-RT Instability into a Loop-like Eruptive Prominence // *The Astrophysical J.* 2019. V. 874. № 57.
- Nataf H.-C.* Seismic imaging of mantle plumes // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. V. 28. P. 391–417.
- Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B.* Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds / Ed. R.W. Carlson // *Treatise on Geochemistry, The Mantle and Core*. V. 3. Elsevier, 2014. P. 547–568.
- Philpotts A.R., Ague J.J.* Principles of igneous and metamorphic petrology / 2nd edition. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. 667 p.
- Potter E., Szatmari P.* Global Miocene tectonics and the modern world // *Earth-Science Reviews*. 2009. V. 96. P. 279–295.
- Puchtel I.S., Brugmann G.E., Hofmann A.W.* Precise Re-Os mineral isochron and Pb-Nd-Os isotope systematics of a mafic-ultramafic sill in the 2.0 Ga Onega plateau (Baltic Shield) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 170. P. 447–461.
- Rizo H., Andrault D., Bennett N.R., Humayun M., Brandon A., Vlastelic I., Moine B., Poirier A., Bouhifd M.A., Murphy D.T.* ¹⁸²W evidence for core-mantle interaction in the source of mantle plumes // *Geochem. Persp. Lett.* 2019. V. 11. P. 6–11.
- Rubie D.C., Nimmo F., Melosh H.J.* Formation of the Earth's core. *Treatise on Geophysics. Evolution of the Earth* / Eds G. Schubert, D. Stevenson. Amsterdam et al.: Elsevier, 2009. P. 51–90.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry* / Eds D. Holland, K.K. Turekian. Elsevier, 2003. V. 3. P. 1–64.
- Ryabchikov I.D., Sharkov E.V., Kogarko L.N.* Rhönite from mantle peridotites in Syria // *Bull. Tethys Geol. Soc. Cairo*. 2010. P. 9–13.
- Scheinberg A., Elkins-Tanton L.T., Schubert G., Bercovici D.* Core solidification and dynamo evolution in a mantle-stripped planetesimals // *J. Geophys. Res. Planets*. 2016. V. 121. P. 2–20.
- Sharkov E.V.* Origin and Development of Cores of the Terrestrial Planets: Evidence from Their Tectonomagmatic Evolution and Paleomagnetic Data // *The Earth's Core: Structure, Properties and Dynamics* / Ed. J.M. Phillips. N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 2012. P. 39–62.
- Sharkov E., Bogina M., Chistyakov A.* Magmatic systems of large continental igneous provinces // *Geosci. Front.* 2017. V. 8. № 4. P. 621–640.
- Sharkov E., Bogina M.* Composition of Mantle Thermochemical Plumes did not Change from the Mid Paleoproterozoic: Evidence from the LIPs' Study // *Goldschmidt Abstracts*. 2019. 3065.
- Shibazaki Y., Ohtani E., Teresaki H., Suzuki A., Funakoshi K.* Hydrogene partitioning between iron and ringwoodite into the Martian core // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 287. P. 463–470.
- Stille H.* Grundfragen der vergleichenden Tektonik. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1924.
- Walker R.J., Morgan J.W., Hanski E.J., Smolkin V.F.* Re-Os systematics of early Proterozoic ferropicrites, Pechenga complex, northwestern Russia: evidence for ancient ¹⁸⁷Os-enriched plume // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. P. 3145–3160.
- Wang T., Song X., Xia H.H.* Equatorial anisotropy in the inner part of Earth's inner core from autocorrelation of earthquake coda // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. P. 224–227.
- Xu W.W., Zheng T.Y., Zhao L.* Mantle dynamics of the reactivating North China Craton: Constraints from the topographies of the 410-km and 660 km discontinuities // *Science China. Earth Sciences*. 2011. V. 54. № 6. P. 881–887.
- Young Y.-N., Tufo H., Dubey A., Rosner R. J.* On the miscible Rayleigh–Taylor instability: two and three dimensions // *Fluid Mech. Cambridge: Cambridge University Press*, 2001. V. 447. P. 377–408.

Mechanisms of Translation of Deep-Seated Pulses into External Shells of the Modern Earth: Evidence from Late Cenozoic Global Tectonomagmatic Activation of Our Planet

E. V. Sharkov^{1, *}, M. M. Bogina¹, and A. V. Chistyakov¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: esharkov@mail.ru*

It is known that the Earth's history is characterized by periodic activation of tectonomagmatic processes, when they are intensified without visible reasons. This is obviously related to the evolution of deep-seated petrological processes, the peculiar reflect of which are events in the external shells of the modern Earth (tectonosphere), but the nature of these processes and mechanisms of their translation in tectonosphere remain weakly studied. This problem is considered by the Late Cenozoic (Neogene–Quaternary) global activation. The modern Earth represents a cooling body with solidifying liquid iron core. This process should be accompanied by several thermodynamic, physical, and physical-chemical effects, which could lead to the internal activation of our planet. We attempted to decipher these problems using available geological, petrological, geochemical, and geophysical data on the present-day activation. It is shown that main active element in the modern Earth is uninterruptedly upward moving thin crystallization zone located between completely solidified part of the core (solid inner core) and its completely liquid part (external liquid core). Diverse phase transitions in a cooling melt passing through bifurcation points are related to this zone. The phase transitions are represented by both a change of crystallizing solid phases which built up inner core and retrograde boiling with formation of drops of “core” fluids. These drops are floated in high-Fe host melt and are accumulated at the mantle base, where they are involved in the formation of mantle plumes, which are the main carriers of deep-seated pulsed into external geosphere, and finally leave the core with them. It is suggested that in one of such points the fluid solubility in cooling high-Fe liquid of external core sharply decreases. This should lead to the simultaneous intensification of retrograde boiling of this melt over the entire zone surface of zone of the core crystallization zone, i.e., on a global scale. This could provide the influx of excess “core” fluids required for large-scale generation of mantle plumes and serve as trigger for Late Cenozoic global tectonomagmatic activation of the Earth.

Keywords: activation of tectonomagmatic processes, solidification of the core, external (liquid) and inner (solid) core of the Earth, high-Fe liquid, bifurcation point, retrograde boiling, mantle plumes, global petrology