



СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ – ОСНОВА НОВОЙ НАУЧНОЙ ПАРАДИГМЫ В ПЕТРОЛОГИИ

В. С. Шкодзинский



**Владимир Степанович
Шкодзинский,**

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН

Парадигмой называется система основополагающих представлений, распространённых в науке на том или ином этапе её развития. Петрология – раздел геологической науки, посвящённый изучению процессов образования горных пород. Большинство этих процессов недоступно для непосредственных наблюдений, поскольку протекают они на большой глубине или происходили в далёком прошлом. Прохождение через мантию сейсмических волн свидетельствует о том, что она, в основном, является твёрдой. Тем не менее из неё постоянно поднимаются магмы, иногда в очень больших количествах (до многих тысяч кубических метров). Это противоречие принято объяснять тем, что магмы образуются путём отделения расплава из слабо подплавленных (на 0,1 – 15%) глубинных пород. В таких породах кристаллы соприкасаются, поэтому в них распространяются упругие колебания и они близки по свойствам к твёрдым телам.

Многие магматические породы содержат в тысячи раз больше расплавофильных компонентов (щелочей, летучих элементов, лёгких редких земель и др.), чем в случае образования их путём отделения выплавки. Обычно предполагается, что эти компоненты привнесены при магмообразовании из неведомых источников гипотетическими потоками летучих компонентов (флюидов). Согласно этим представлениям первоначально однородная Земля дифференцировалась благодаря всплыванию в её недрах наиболее лёгких химических соединений.

Однако эта, казалось бы, логичная система взглядов (парадигма) за последние десятилетия пришла в глубокое противоречие с эмпирическими данными. Экспериментальные исследования [1] показали, что из наиболее распространённой мантийной породы перидотита расплав не отделяется при плавлении его менее чем на 35 – 40%,

На фото вверху – горячая аккреция Земли и ее магматический океан (sotvoreniye.ru)

вследствие большой прочности каркаса минералов. Это подтверждается обычно отсутствием инъекций во вмещающие породы и, следовательно, автохтонностью (расположением на месте зарождения) возникших в гнейсах путём частичного плавления (анатексиса) гранитных обособлений даже при содержании 40 – 45%. Количество их в метаморфизованных осадочных породах (парагнейсах) является выдержанным (рис. 1) во всех регионах [2], что также свидетельствует об автохтонности обособлений. Поэтому частичное плавление пород земной коры не приводило к образованию кислых (богатых кремнекислотой) магм, как обычно предполагается.

В вынесенных кимберлитовыми магмами обломках (ксенолитах) мантийных пород отсутствуют признаки частичного плавления и повышения температуры. Наоборот, в них широко распространены явления распада высокотемпературных минералов и замещения низкотемпературными. Судя по минеральным равновесиям в ксенолитах, температура мантии древних платформ на глубине 150 км понижалась примерно на 200°С каждый миллиард лет (рис. 2). Поэтому в ней не происходили

процессы разогрева, частичного плавления и отделения выплавок, как обычно принимается.

С позиций гипотезы выплавления невозможно убедительно объяснить раннее формирование больших объёмов кислых магм и кислой кристаллической коры. По экспериментальным данным, кислые расплавы в реальных бедных водой первичных перидотитах могли формироваться при малобарическом (менее 3 кб) начальном (на 1 – 3%) их плавлении [3]. Но на Земле температура недр при таком давлении (на глубине менее 10 – 12 км) во много раз ниже, чем необходимо для начала плавления этих пород. Попыткам объяснить генезис таких расплавов выплавлением из мантийных основных пород (эклогитов) противоречат отсутствие кислых обособлений во многих тысячах изученных ксенолитов этих пород из кимберлитов и намного большая древность кислой кристаллической коры (3,8 – 2 млрд лет) по сравнению с эклогитами (в среднем 1,4 млрд лет) (см. рис. 2).

Мантийные породы очень бедны летучими компонентами (обычно доли процента), поэтому в них нет источников флюида. Нет их и в ядре, судя по бедности ими железных метеоритов, являющихся чаще всего

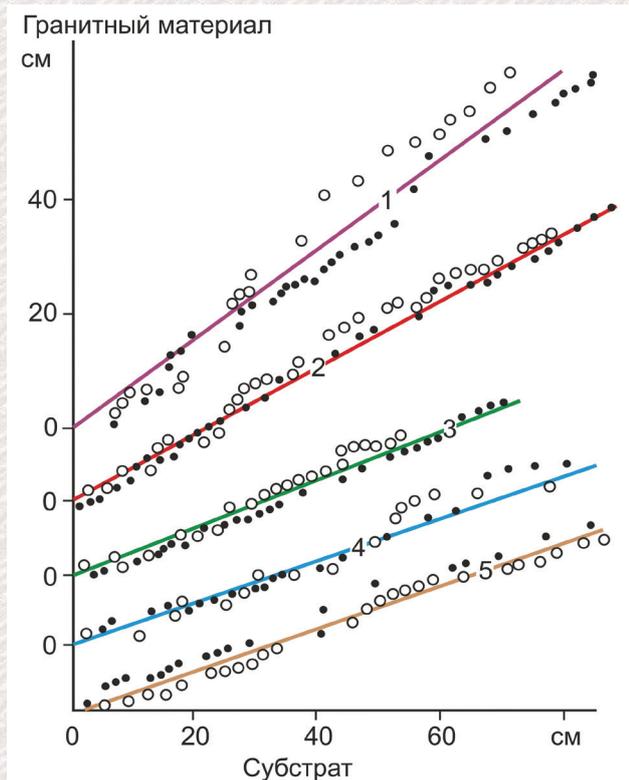


Рис. 1. Соотношение последовательных сумм анатектических обособлений и тел субстрата в биотит-гранатовых парагнейсах р. Амедици Алданского щита.

Прямолинейность линий соотношений и близкое положение точек разных замеров свидетельствуют о равномерном распределении обособлений в породах одинакового состава [2]

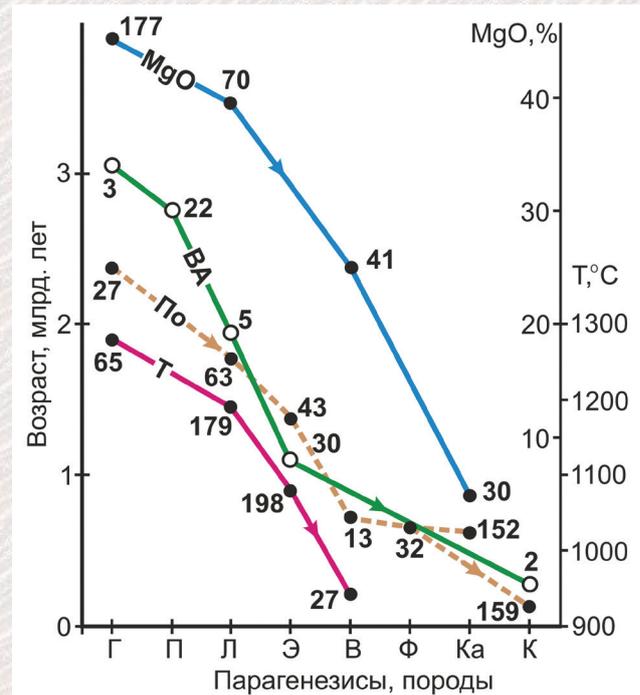


Рис. 2. Средние изотопные возрасты различных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По), включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования при 50 кб (линия Т) и среднее содержание MgO (линия MgO) в породах. Состав пород и включений в алмазах: Г – гарцбургитовый; П – перидотитовый нерасчленённый; Л – лерцолитовый; Э – эклогитовый; В – верлитовый и вебстеритовый; Ф – флогопитсодержащие породы; Ка – карбонатиты; К – кимберлиты. Числа у точек – количество использованных определений [2]

обломками ядер мелких планет. Вследствие очень высокого давления в мантии не могут существовать открытые трещины и поры, необходимые для движения флюида. Температура мантии на сотни градусов выше температуры плавления её пород в присутствии флюидной фазы. Поэтому мантия полностью расплавилась бы в случае содержания в ней флюида [2]. Следовательно, преимущественно твердофазное её состояние, по геофизическим данным, указывает на отсутствие в ней флюидной фазы и её потоков.

Это рассмотрение показывает, что основанные на гипотезе выплавления главные положения современной петрологической парадигмы находятся в противоречии с эмпирическими данными и создают лишь видимость решения генетических проблем. Вследствие массового повторения в течение десятков лет эти положения глубоко укоренились в сознании и не подвергаются сомнению. Но получаемые путём использования ошибочных исходных положений решения частных генетических проблем также являются глубоко ошибочными и лишь увеличивают число не решённых вопросов. Эта парадигма предполагает существование нереальных процессов, поэтому не пригодна для прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых, то есть для решения главной задачи геологической науки. Большие затраты государственных средств и труд тысяч исследователей в этом случае являются малоэффективными. Следовательно, необходим полный пересмотр действующей сегодня петрологической парадигмы.

Базой для такого пересмотра являются полученные в последние десятилетия многочисленные доказательства горячей аккреции планет земной группы. К их числу относятся установленный в результате полётов на Луну магматический генезис всех её коренных пород, их очень древний возраст (обычно более 4 млрд лет), преимущественно анортозитовый (плагиоклазовый) состав и большая мощность (до 100 км) её коры [4]. Такая кора сформировалась в результате всплывания плагиоклаза в кристаллизовавшемся глобальном океане магмы глубиной около 1000 км. О существовании подобного океана на Земле свидетельствуют присутствие трендов магматической дифференциации (фракционирования) в мантийных ксенолитах из кимберлитов (см. рис. 2, линия MgO), уменьшение среднего изотопного возраста и температуры кристаллизации различных верхнемантийных пород в соответствии с последовательностью их формирования при магматическом фракционировании (см. рис. 2), проекции линий древних геотермических градиентов в область очень высокой температуры на земной поверхности (до 1000° С) и ряд других данных [2].

Эти новые результаты не учтены в рассмотренной выше господствующей петрологической парадигме, так как она основана на выдвинутой в середине прошлого столетия гипотезе О. Ю. Шмидта [5] и других о холодной гомогенной аккреции Земли. В ней предполагалось, что одновременно слипались холодные силикатные и железные частицы, которые затем разделились в земных недрах по плотности и сформировали железное ядро и силикатную мантию.

Учёт процессов фракционирования глобального магматического океана впервые позволяет убедительно во всех деталях решить генетические вопросы петрологии без предположения существования недоказанных полуфантастических процессов. Как показали расчёты Харриса и Тозера [6], скорость слипания (аккреции) немагнитных частиц металлического железа в протопланетном диске была в двадцать тысяч раз больше, чем намагнитных, что за несколько лет привело к возникновению их агрегатов в тысячу и более частиц. Поэтому земное ядро сформировалось раньше силикатной мантии в результате быстрого слипания железных частиц. Быстрая аккреция резко сократила масштабы рассеивания импактного (возникавшего при ударах) тепла за счёт излучения при формировании ядра и обусловила примерно на 1000° С изначально более высокую его температуру по сравнению с позже формировавшейся мантией [2]. Это является причиной последующего подогрева ядром последней и возникновения в ней конвективных потоков. То есть конвекция является результатом подогрева мантии, а не её остывания, как обычно предполагается. В этом случае плюмы (восходящие потоки) возникали в нижней мантии, а не зарождались в верхней. Постепенный прогрев мантии ядром – причина увеличения во времени числа плюмов и распространённости связанного с ними магматизма.

Формирование железного ядра раньше силикатной мантии объясняет отсутствие обеднённости её пород сидерофильными элементами (Ni, Co, Cu, Au и др.) [7]. Такая обеднённость должна была бы существовать в случае обычно предполагаемого совместного выпадения железных и силикатных частиц при аккреции вследствие более высокой (на 1 – 2 порядка) растворимости этих элементов в металлическом железе по сравнению с силикатами. Доказательством более поздней аккреции силикатных частиц является и высокая окисленность мантийных пород по сравнению с железным ядром. Химическая активность кислорода при их образовании была примерно на 4 порядка выше, чем в случае равновесности с металлическим железом [8]. Признаки раннего формирования ядра по сравнению с мантией однозначно свидетельствуют о том, что аккреция Земли была гетерогенной, а не гомогенной, как обычно принимается.

Выпадавшие на сформировавшееся ядро силикатные частицы плавильлись в результате, главным образом, импактного тепловыделения, что привело к образованию магматического океана. Предложено множество моделей этого океана. Их большим недостатком является обычно игнорирование существования синаккреционной стадии его эволюции и вытекающий из этого неучёт расслоённости океана по составу [2]. Такие упрощения не позволяют объяснить природу главных особенностей коры и мантии.

Как показали расчёты [2], придонные части океана магмы при аккреции частично кристаллизовались под влиянием роста давления новообразованных верхних частей и сформировали из кумулатов (осаждавшихся кристаллов) породы нижней мантии, а из остаточных

расплавов – различные слои магматического океана. Вследствие ещё незначительной его глубины и пониженной силы тяжести на ранней небольшой Земле придонное фракционирование длительное время было малобарическим, поэтому остаточные расплавы варьировали по составу от толеитов (бедных щелочами основных пород) до гранитов. Только существование массовых малобарических процессов раннего синаккреционного фракционирования позволяет объяснить широкое развитие на Земле гранитов и толеитов.

По мере дальнейшей аккреции, вследствие повышения её интенсивности и температуры [2], в магматическом океане формировались всё более мафические (богатые магнием) остаточные расплавы. Они располагались в соответствии со своей плотностью. Это обусловило возникновение в океане расслоённости по составу. Его придонный перидотитовый слой был намного более плотным (около 2,8 г/см³), чем верхний кислый (2,3 г/см³). Поэтому при остывании в океане не возникла единая конвекции от дна до поверхности. Расслоённый магматический океан глубиной около 240 км в течение почти всей истории Земли затвердевал сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь.

Затвердевание верхнего кислого слоя привело к образованию слагающих кристаллическую кору эндебитов (содержащих гиперстен) и серых гнейсов (с амфиболом) из кумулатов и древних гранитов остаточных расплавов. Оно началось 4,2 – 4,1 млрд лет назад, судя по возрасту самых древних на Земле цирконов. Присутствие в них включений кварца подтверждает кислый состав ранней коры. Ранее 4,2 млрд лет земная поверхность была полностью покрыта магмой, что объясняет отсутствие более древних пород. Кристаллизация нижних слоёв океана обусловила возникновение литосферы (твёрдой оболочки) древних платформ (рис. 3).

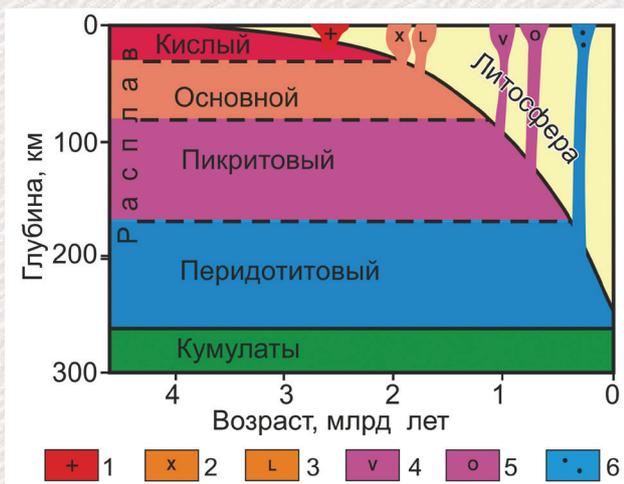


Рис. 3. Схема кристаллизации постаккреционного расслоённого магматического океана и эволюции магматизма на древних платформах.
 Состав магм: 1 – кислый; 2 – субщелочной;
 3 – анортозитовый; 4 – карбонатитовый;
 5 – щелочной; 6 – кимберлитовый

Обособление остаточных расплавов при кристаллизации гнейсов магматического генезиса (ортогнейсов) привело к образованию в них большого количества бескорневых гранитоидных выделений. Причина их автохтонности и массового распространения долгое время была непонятной и обусловила популярность в IX – XX вв. гипотезы о формировании этих выделений путём региональной метасоматической гранитизации, то есть путем привноса гипотетическими флюидами химических компонентов, типичных для гранитов. Но признаки инертного поведения всех химических компонентов при их кристаллизации и множество других данных противоречат метасоматическому генезису [2]. Поэтому постепенно широкое распространение получили представления о формировании их путём частичного плавления. Однако в ортогнейсах обособления являются более низкотемпературными, чем исходные породы, поскольку обогащены гидроксилсодержащими минералами. Это противоречит образованию их путём плавления и свидетельствует об остаточно-магматическом формировании, то есть в результате кристаллизации магм. Таким образом, данные о существовании на Земле магматического океана полностью решают крупную проблему природы региональной гранитизации раннего докембрия, которую не удавалось решить в течение двух веков.

Вследствие отсутствия обширной конвекции в расслоённом океане его верхний кислый слой затвердел относительно быстро при сохранении ещё полужидкого состояния глубинных плотных слоёв. Это является причиной раннего образования кислой кристаллической коры (в основном 3,8 – 2 млрд лет назад) и позднего формирования многих его глубинных дифференциатов (примерно 700 млн лет назад в среднем для богатых пироксенами верлитовых и вебстеритовых ксенолитов в кимберлитах и около 600 млн лет для карбонатитов и 136 млн лет для кимберлитов) (см. рис. 2). Данный вывод подтверждается тем, что наиболее древний пик распространённости коровых цирконов приходится на возраст 3,8 млрд лет, тогда как возраст верхнемантийных цирконов равен 3,4 – 3,2 млрд лет [9].

Быстрое затвердевание кислого слоя объясняет раннее возникновение на кислой коре осадочных пород и живых организмов. Гнейсы на земной поверхности подвергались интенсивному химическому изменению под влиянием остывавшей горячей газовой оболочки. В результате оглинивания полевых шпатов и отделения глинистого материала возникали скопления глин и остаточного кварца. Их метаморфизм под влиянием ещё горячего основания обусловил формирование высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов и обычно совместное их нахождение. Это объясняет широкое распространение и очень большую мощность их тел (иногда сотни метров для кварцитов). По мере снижения температуры в горячих водоёмах происходило осаждение карбонатов и образование мраморов, характерных для верхних частей докембрийских толщ.

Богатые кислотными эманациями магматического океана горячие дождевые воды выносили железо и

кремнекислоту из химически изменявшихся ортогнейсов в ранние водоёмы. Это привело к образованию большого количества железистых кварцитов, являющихся главными месторождениями железных руд. Вследствие очень высокой температуры газовой оболочки отделявшиеся из магматического океана эманации мало остывали, рассеивались в ней и чаще всего не формировали гидротермальные месторождения. Это объясняет обычно безрудность огромных объёмов древних гранитогнейсов в отличие от высокой гидротермальной рудоносности молодых гранитов. Накопление рудных компонентов в газовой оболочке привело к массовому образованию стратиформных (осадочных) месторождений меди, свинца, цинка и некоторых других элементов в основном в протерозое, когда эта оболочка остыла и происходило осаждение из неё рудных компонентов.

Массовые процессы испарения дождевых вод на горячей земной поверхности и конденсации паров в верхней части газовой оболочки обусловили интенсивную ионизацию последней и возникновение многочисленных электрических разрядов. Они способствовали формированию органических соединений и зарождению живых организмов в горячих водоёмах. Поэтому благодаря горячему образованию на ранней стадии эволюции Земли возникли первые примитивные бактерии [2].

Кристаллизация из кислого слоя магматического океана большинства пород кристаллической коры является причиной массового распространения в них высокотемпературных минеральных парагенезисов в отличие от обычно локального в среднем более низкотемпературного метаморфизма молодых толщ. Такое происхождение объясняет огромную мощность кристаллической коры (до 40 – 50 км) и повсеместно однотипный её состав.

Подъём остаточных расплавов из нижних частей кислого слоя сопровождался формированием кислых магм, сначала малоглубинных с низким содержанием щелочей, затем всё более глубоких и щелочных (см. рис. 3). Это объясняет массовое образование гранитов в докембрии. Последующее выжимание и всплытие наиболее кислых пластичных частей кристаллической коры в областях сжатия (коллизии) приводило к их фрикционному и декомпрессионному плавлению и к образованию характерных для этих областей огромных гранитных батолитов. Такой генезис подтверждается идентичностью их состава с раннедокембрийскими гранитоидами и присутствием только в областях с кислой кристаллической корой [2].

Подъём малодифференцированных магм из основного и пикритового слоёв привёл к формированию базальтов и коматиитов раннедокембрийских зеленокаменных поясов. Содержание MgO в них постепенно уменьшалось (в среднем от 32,5 в ранних до 21,0% в поздних), вследствие постепенной кристаллизации этих слоёв и выноса из расплава магния осаждающимися кристаллами. Небольшое ещё накопление щелочей в этих слоях является причиной нехарактерности

щелочных пород для зеленокаменных поясов. Пониженная плотность и высокая пластичность горячей кислой коры была неблагоприятной для подъёма мафических магм и определила относительно небольшую площадь ранних поясов по сравнению с поздними провинциями основных пород. В это время твёрдая оболочка имела небольшую мощность, поэтому в ней не возникали крупные импактные кратеры, как на Луне. Но падение крупных тел, видимо, способствовало излияниям глубинных магм. Выжимание плагиоклазовых кумулатов обусловило образование огромных тел автономных анортозитов преимущественно в протерозое. Участие в их формировании средних магм является причиной часто кислого состава в них плагиоклаза (до андезина и олигоклаза).

Процессы высокобарического фракционирования в придонном перидотитовом слое магматического океана обусловили образование щелочных, карбонатитовых и кимберлитовых остаточных расплавов и магм. Очень длительные (миллиарды лет) процессы накопления расплавофильных компонентов в остаточных расплавах являются причиной гигантского содержания редких элементов (до десятков тысяч хондритовых норм) в карбонатитах и щелочных породах. Вследствие кристаллизации расслоённого магматического океана сверху вниз его придонный слой фракционировал наиболее поздно. Это обусловило молодой возраст карбонатитов и кимберлитов (см. рис. 2), возникавших

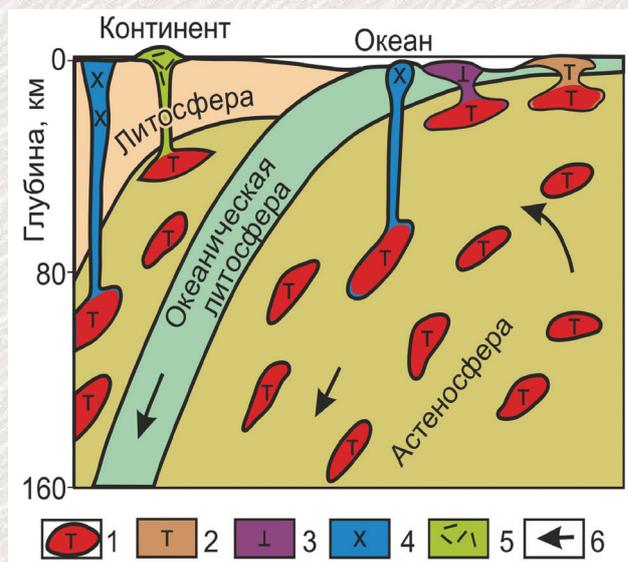


Рис. 4. Схема образования магм в океанических областях:

- 1 – очаги толеитовых магм в астеносфере;
- 2 – недифференцированные магмы срединно-океанических хребтов; 3 – дифференцированные толеитовые магмы океанических островов;
- 4 – субщелочные и щелочные магмы абиссальных океанических равнин и внешних магматических поясов зон субдукции; 5 – дацит-андезит-базальтовые магмы субдукционных вулканических поясов; 6 – направление потоков в астеносфере

из его последних расплавов. Такой генезис объясняет все многочисленные особенности кимберлитов и их алмазов [2].

Декомпрессионное плавление наиболее легкоплавких пород нижней мантии, эклогитов (затвердевших расплавов раннего синаккреционного океана), в поднимавшихся плюмах привело к образованию большого количества толеитовых магм. Осаждение не содержащего щелочей баррофильного граната в остывавших очагах толеитовых магм под толстой литосферой в условиях высокого давления сопровождалось образованием щёлочно-основных и щелочных магм (рис. 4). Интенсивная малоглубинная дифференциация таких очагов в астеносфере под влиянием охлаждения опускавшейся холодной океанической литосферы приводила к формированию кислых магм в островных дугах и на окраинах континентов (в зонах субдукции).

Таким образом, учёт горячей гетерогенной аккреции Земли впервые позволяет убедительно, однозначно, с единых позиций, во всех деталях, без привлечения недоказанных полуфантастических предположений объяснить природу, особенности состава, возраста и распространения различных пород коры и мантии. Если следствия модели холодного образования Земли находятся в противоречии с эмпирическими данными, то все следствия её горячего генезиса полностью ими подтверждаются. Ни одна концепция в геологической науке не была такой плодотворной, как концепция глобального океана магмы. Вытекающие из неё представления являются новой петрологической парадигмой. Очевидна необходимость её широкого использования и отказа от устаревших взглядов.

Список литературы

1. Arndt, N. T. *The separation of magmas from partially molten peridotite* / N. T. Arndt // *Carnegie Inst. Wash. Yeab.* – 1977. – Vol. 76. – P. 424–428.
2. Шкодзинский, В. С. *Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли)* / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Изд-во СВФУ, 2014. – 452 с.
3. Грин, Д. Х. *Состав базальтовых магм как критерий их возникновения при вулканизме* / Д. Х. Грин // *Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана.* – М. : Мир, 1968. – С. 118–131.
4. Snyder, G. A. *Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution* / G. A. Snyder, L. E. Borg, L. E. Nyquist [et al.] // *The origin of the Earth and Moon.* – Univ. of Ariz. Press, 2000. – P. 361–395.
5. Шмидт, О. Ю. *Происхождение Земли и планет* / О. Ю. Шмидт. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.
6. Harris, P. G. *Fractionation of iron in the Solar system* / P. G. Harris, D. C. Tozer // *Nature.* – 1967. – Vol. 215, № 5109. – P. 1449–1451.
7. Рингвуд, А. Е. *Происхождение Земли и Луны* / А. Е. Рингвуд. – М. : Недра, 1982. – 294 с.
8. O’Neil, H. S. *Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth’s mantle: implications for the origin of the Earth* / H. S. O’Neil // *Meteoritics.* – 1990. – Vol. 25, № 4. – P. 395.
9. Добрецов, Н. Л. *Ранняя история Земли: роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора* / Н. Л. Добрецов, О. М. Туркина // *Геология и геофизика.* – 2015. – Т. 56, № 7. – С. 1250–1274.

НОВЫЕ КНИГИ



Валерий Лепов. Философия Солнца и звёзд / Валерий Лепов. – Новокузнецк : Союз писателей, 2014. – 180 с.

Знакомясь со сборником «Философия Солнца и звёзд», читатель почувствует себя по-настоящему космическим существом, связанным незримыми нитями со всем окружающим. Люди и звёзды действительно состоят из одного вещества, но мы часто забываем об этом потрясающем факте. А поэзия Валерия Лепова буквально пропитана этим ощущением, её можно сравнить с камертоном для настройки «звучания» души. Изящество слога, точность образов, глубина мысли – таков язык, которым написаны эти стихи, приглашающие к размышлению, виртуальному разговору с автором.