

В. С. Шкодзинский



**Владимир Степанович  
Шкодзинский,**

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

#### **Некоторые нерешённые вопросы**

Вид таинственного звёздного неба с древнейших времён вдохновлял людей на поиски ответа на вопрос – как образовались небесные тела и Земля? Ввиду недостатка эмпирических данных, выдвигавшиеся в те давние времена представления об этих процессах были умозрительными, а потому фантастическими и даже мистическими. В дальнейшем, по мере развития наук, начали использоваться появлявшиеся конкретные факты.

Очевидно, что геологическое строение и эволюция Земли в значительной мере определяются происхождением, поэтому геологические данные имеют основополагающее значение для выяснения её генезиса. Однако эти данные до сих пор почти не использовались. Ниже показано, что они позволяют совершенно по-новому решать проблему происхождения нашей планеты.

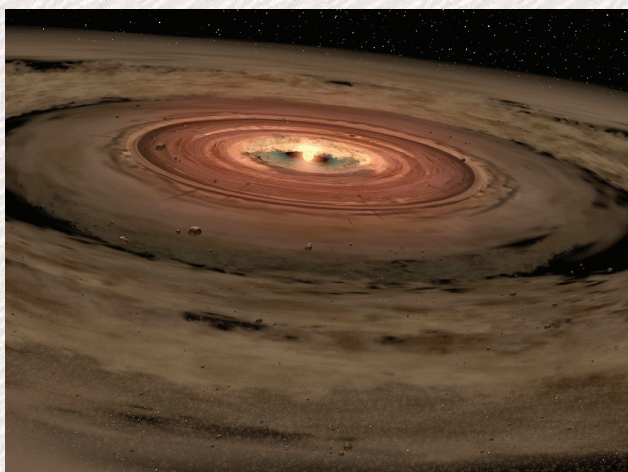
Прежде всего необходимо кратко рассмотреть существующие представления о генезисе исходного материала Земли. К настоящему времени с помощью космического телескопа «Хаббл» открыты сотни межзвёздных газово-пылевых туманнос-

тей, в которых зарождаются звёзды (см. фото вверху). Вокруг некоторых из них вращаются планеты. Поэтому выдвинутая в восемнадцатом веке Кантом и Лапласом небулярная гипотеза образования Солнечной системы путём гравитационного сжатия газово-пылевого облака стала наиболее распространённой. По современным представлениям, рост давления и температуры в центральной части этого облака вызвал в нём реакцию образования гелия из водорода, что резко повысило температуру и привело к формированию Солнца. Давление излучения обусловило удаление большинства газов из его окрестностей, что является причиной большого их содержания во внешних планетах Солнечной системы (Юпитере, Сатурне, Уране) и малого – во внутренних (Меркурии, Венере, Земле и Марсе).

По представлениям О. Ю. Шмидта [1], которые являются общепринятыми в настоящее время, Земля сформировалась из холодных частиц протопланетного диска (рис. 1). Их слипание (аккреция) происходило под влиянием гравитационных сил и было очень длительным – более 1 млрд лет – по О. Ю. Шмидту и около

*На фото вверху – водородно-пылевое облако с зарождающимися звёздами в туманности Карина ([http://www.nasa.gov/images/content/447139main\\_hubble20th-img.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/447139main_hubble20th-img.jpg)).*





**Рис. 1. Протопланетный диск**  
(<http://www.walkinspace.ru/news/2011-02-22-59>).

100 млн лет – по В. С. Сафронову [2]. Подсчитано, что в ходе аккреции за счёт преобразования механической энергии в тепловую выделилось порядка  $23,2 \cdot 10^{31}$  Дж тепла, что могло бы испарить вещество Земли и нагреть его до  $36\,000^\circ\text{C}$ . Однако большая длительность образования нашей планеты, по мнению сторонников гипотезы холодной аккреции, обусловила рассеивание выделявшегося тепла в космическое пространство. Эта гипотеза основана, главным образом, на результатах расчётов динамики слипания частиц под влиянием гравитационных сил и не учитывает роли магнитных сил, а также многих имеющих космохимических и изотопных геологических данных. Поэтому неслучайно во второй половине прошлого столетия основные положения гипотезы холодной аккреции Земли оказались в противоречии с результатами полётов космических аппаратов и космонавтов на Луну. Неожиданно они выявили признаки горячего образования нашего спутника, которыми являются: отсутствие на Луне исходного вещества, не проходившего стадии плавления; магматическое происхождение всех её пород; очень древний ( $4,4 - 3,7$  млрд лет) изотопный их возраст; очень высокое содержание во многих из них химических компонентов ( $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , редкоземельные элементы), накапливавшихся в остаточных расплавах при кристаллизации магм. Это указывает на существование и дифференциацию (фракционирование) на ранней стадии эволюции Луны глобального океана магмы. Особенно показательным присутствием на этом спутнике слоя анортозитов мощностью  $60 - 100$  км, который образовался в результате всплывания кальциевого алюмосиликата плагиоклаза в магматическом океане. Кора подобной мощности могла образоваться только из слоя расплава глубиной не менее  $1000$  км [3]. Таким образом, новейшие данные свидетельствуют о горячем образовании некоторых космических тел, но дискуссия по этому вопросу ещё продолжается.

Для установления природы движущих сил интенсивных тектонических магматических процессов на Земле важно выяснить, была ли аккреция гомогенной,

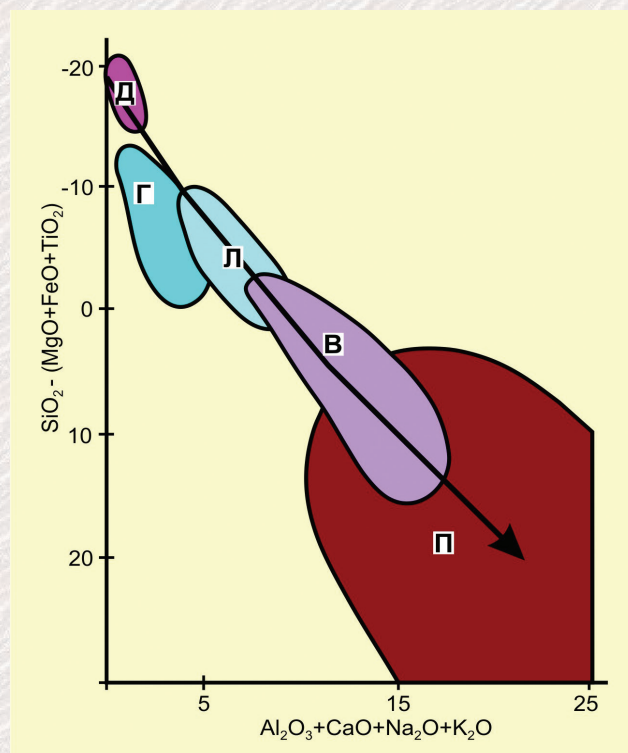
при которой состав выпадавшего материала не менялся во времени, или гетерогенной, предполагающей его значительное изменение. Наиболее распространённая гипотеза гомогенной аккреции нашей планеты создаёт большие трудности в объяснении причин очень высокой температуры земного ядра и существования в мантии конвекции.

В решении этих проблем решающее значение имеют геологические данные, поскольку они дают наиболее прямые ответы на генетические вопросы.

#### Геологические доказательства горячей аккреции Земли

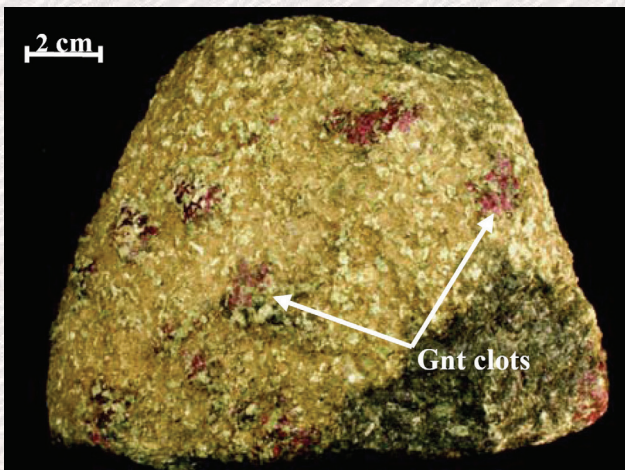
Если Земля имеет горячее происхождение, на ней существовал океан магмы, подобный лунному, и происходила дифференциация его вещества путём отсадки кристаллизовавшихся минералов, то наиболее крупная земная оболочка – мантия – должна сохранить признаки этой дифференциации. Хорошо изученные расчлённые интрузии магм свидетельствуют, что к таким признакам относятся особенности состава пород, а также закономерная возрастная и температурная последовательности их образования.

Остывавшие в малоглубинных условиях богатые магнием магмы в результате осаждения последовательно кристаллизовавшихся минералов формировали



**Рис. 2. Соотношение полей состава пород, образующихся при фракционировании богатых магнием магм в малоглубинных условиях.**  
Д – дуниты; Г – гарцбургиты; Л – лерцолиты; В – верлиты; П – пикриты, базиты, граниты. Стрелка – направление фракционирования [4].





**Рис. 3. Широко распространённая в мантии порода гарцбургит. Розовое – гранат. Ксенолит из трубки Кимберли (Юж. Африка) [5].**



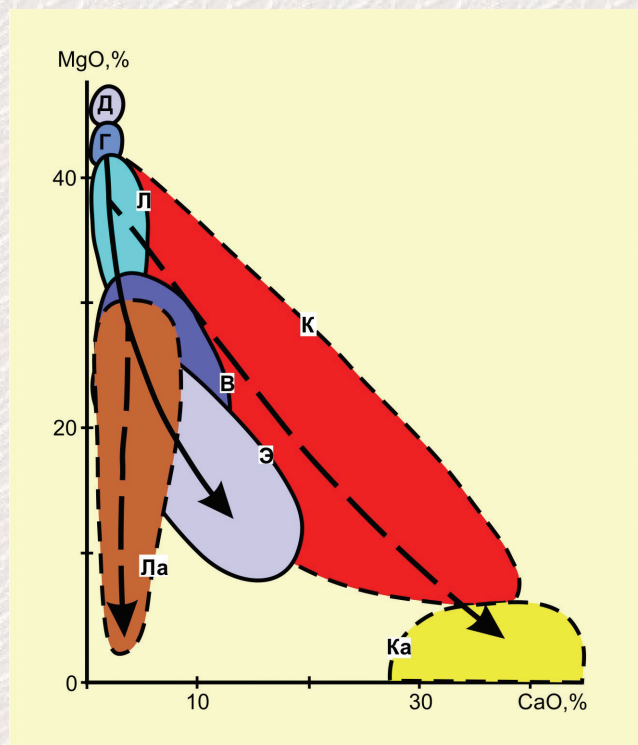
**Рис. 4. Эклогит. Ксенолит из трубки Кимберли [6].**

различные кумулятивные породы – сначала дуниты, (сложенные, в основном, магниевым силикатом оливином), затем гарцбургиты (оливин + железо-магниевый силикат гиперстен), далее – лерцолиты (оливин + гиперстен + кальцийсодержащий силикат клинопироксен), затем – вебстериты и верлиты (преимущественно гиперстен + клинопироксен). Расплав эволюционировал по составу до богатого кремнекислотой и щелочами основного и гранитного (рис. 2). В характерных для мантии условиях высокого давления остаточный расплав должен изменяться до богатого известью эклогитового (гранатсодержащего основного), затем – до карбонатитового (состоящего из карбонатов) и кимберлитового (карбонаты + силикаты). Все перечисленные выше кумулятивные породы, действительно, слагают мантийные ксенолиты (случайно захваченные магмами обломки) (рис. 3, 4) в кимберлитах (рис. 5). Это подтверждает образование верхней мантии путём глобального магматического фракционирования.

Если мантийные породы сформировались в результате фракционирования, то их изотопный возраст должен уменьшаться в приведённой выше последовательности образования. Действительно, средний изотопный возраст оказался равным: для дунитов и гарцбургитов – 2,325 млрд лет, для лерцолитов – 1,777 млрд лет, верлитов и вебстеритов – 0,713 млрд лет. Возникшие из остаточных расплавов эклогиты имеют средний возраст 1,407 млрд лет, карбонатиты – 0,688 млрд лет, кимберлиты – 0,236 млрд лет (рис. 6). Это согласуется с полученным средним возрастом включений в кристаллизовавшихся в процессе фракционирования алмазах: 3,03 млрд лет для гарцбургитовых по составу; 2,777 млрд лет – для перидотитовых (нерасчленённых гарцбургитовых + лерцолитовых); 1,966 млрд лет – для лерцолитовых; 1,123 млрд лет – для эклогитовых и 0,357 млрд лет – для кимберлитовых. Обращает на себя внимание чаще всего несколько более древний возраст включений в алмазах (2,777 млрд лет для гарцбургитовых) по сравнению с возрастом одноимённых пород (2,325 млрд лет для гарцбургитовых кумулятов).

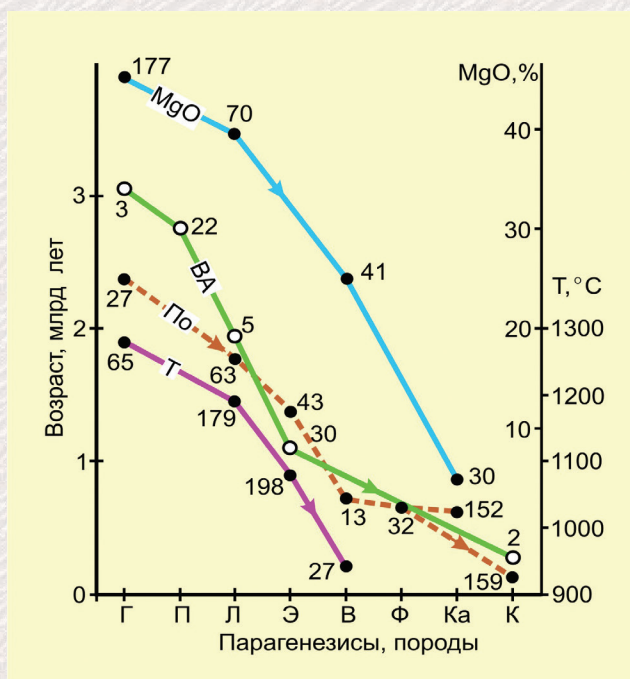
Такое различие вполне закономерно и обусловлено защитной ролью прочнейшего алмазного вещества, предохранявшего самые ранние минералы от их частичного растворения наиболее неравновесным поздним остаточным расплавом.

Земля имеет возраст около 4,56 млрд лет, а наиболее древние включения в алмазах – в среднем 3,03 млрд лет. Эта разница связана с тем, что обра-



**Рис. 5. Соотношение полей состава пород, слагающих мантию под континентами. Ка – карбонатиты; К – кимберлиты; Э – эклогиты. Другие обозначения см. на рис. 2.**





**Рис. 6.** Средний изотопный возраст различных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия Po), включений в алмазах (линия BA), средняя температура образования при 5 ГПа (линия T) и среднее содержание MgO (линия MgO) в породах.

**Состав пород и включений в алмазах:**  
 Г – гарцбургитовый; П – перидотитовый;  
 Л – лерцолитовый; Э – эклогитовый;  
 В – верлитовый и вебстеритовый.  
 Ф – флогопитсодержащие породы;  
 Ка – карбонаты; К – кимберлиты. Числа у точек – количество определений [7].

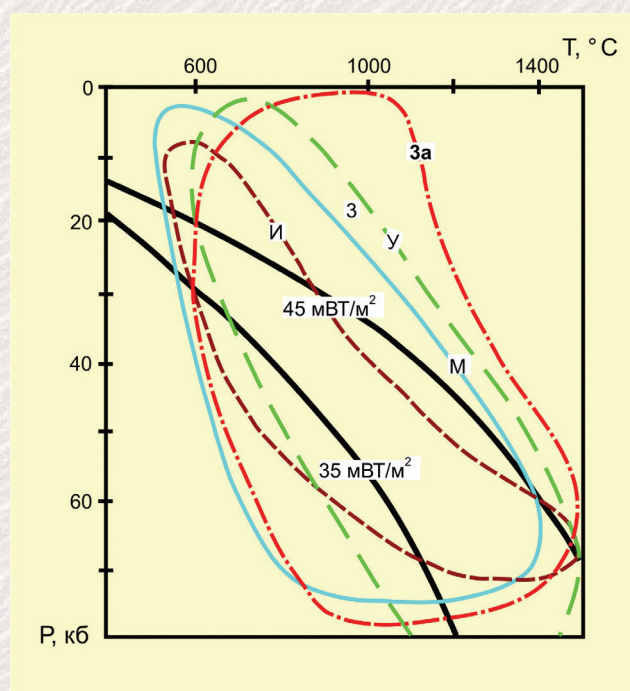
зовавший верхнюю мантию древних континентов пост-аккреционный магматический океан был расщепленным по составу. Поэтому вследствие большого вертикального градиента плотности в нём при остывании не возникло обширной конвекции, и он медленно кристаллизовался сверху вниз. По этой причине нижний слой океана начал затвердевать сравнительно поздно.

При таком происхождении мантии температура формирования минералов, содержащихся в ксенолитах, должна снижаться от гарцбургитов к верлитам + вебстеритам. В настоящее время в литературе опубликовано большое количество результатов оценки P-T условий кристаллизации минералов в мантийных породах. Чтобы избежать влияния давления на результаты оценки средней температуры, определялась величина тепловых потоков, на линии которых попадают точки условий формирования пород на диаграммах P-T. Для гарцбургитов средняя величина теплового потока при кристаллизации оказалась равной 44,9 мВт/м<sup>2</sup>, для лерцолитов – 42,2, для эклогитов – 39,0, для верлитов и вебстеритов – 36 мВт/м<sup>2</sup>. При давлении 5 ГПа (на глубине около 150 км) таким величинам теплового потока соответствует температура 1275, 1190, 1075 и 950 °С,

то есть средняя температура кристаллизации действительно понижалась от ранних дифференциатов к поздним в полном соответствии с последовательностью образования этих пород в процессе магматического фракционирования (см. рис. 6).

При фракционировании в остаточных расплавах должно резко понижаться содержание магнезии, поскольку она выносится кристаллизовавшимися минералами. Действительно, среднее содержание MgO в гарцбургитах со средним возрастом 2,325 млрд лет составляет 45,0%, в лерцолитах с возрастом 1,777 млрд лет – 39,6, в верлитах и вебстеритах с возрастом 0,730 млрд лет – 25,5, в карбонатах с возрастом 0,65 млрд лет – 4,0% (см. рис. 6).

На рис. 7 показаны поля P-T условий кристаллизации мантийных ксенолитов из алмазонасных кимберлитов Якутии. Если экстраполировать эти поля до оси температуры, то они проектируются в область очень высоких её значений – 500 – 1200° С. Примерно в эту же область проектируется и поле условий минералообразования в докембрийских гнейсах [9]. Это также является прямым свидетельством существования на Земле в прошлом глобального магматического океана, что обусловило высокую температуру приповерхностных частей нашей планеты. В таких условиях кимберлиты и карбонаты должны были формироваться из поздних остаточных расплавов его нижнего слоя.



**Рис. 7.** Соотношение температуры (Т) и давления (Р) при кристаллизации ксенолитов из кимберлитов в трубках:  
 3 – «Заполярная»; 3а – «Зарница»; И – «Интернациональная»; М – «Мир»; У – «Удачная». Толстая линия – геотермический градиент при различной величине теплового потока [8].



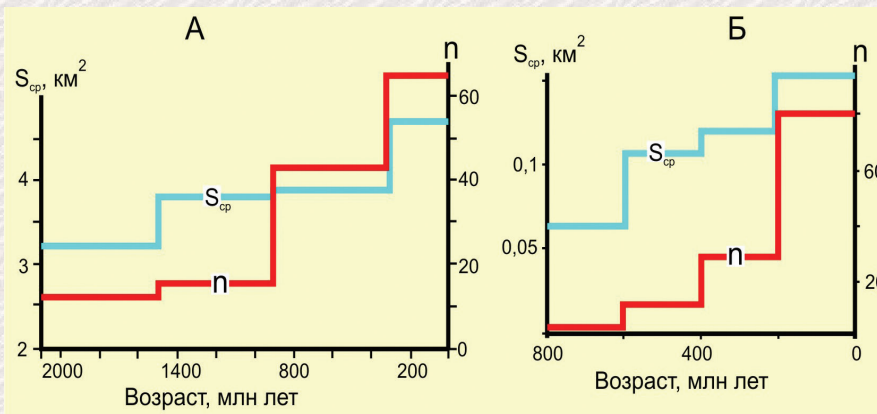


Рис. 8. Зависимость количества ( $n$ ) и средней площади ( $S_{cp}$ ) карбонатитовых (А) и кимберлитовых (Б) тел от времени их образования [8].

Действительно, существенный объем карбонатитов и кимберлитов появляется лишь на поздней стадии развития Земли (2200 и 800 млн лет назад) и особенно резко возрастает в последние 300 – 200 млн лет (рис. 8). Вследствие остывания мантии в карбонатитах быстро увеличивается содержание редкоземельных элементов (рис. 9), накапливавшихся в самых низкотемпературных остаточных расплавах.

Доказательствами горячего образования Земли являются также: 1) многочисленные признаки остывания мантии (повсеместное замещение высокотемпературных минералов низкотемпературными) и земной коры (постепенная смена пластических деформаций хрупкими); 2) повышенное содержание в поздних алмазах азота и лёгкого изотопа углерода, связанное с накоплением их в остаточных расплавах при глубинном фракционировании; 3) отсутствие в земной коре значительного количества пород древнее 4 млрд лет и следов завершившей аккрецию массовой метеоритной бомбардировки, связанных с длительным расплавленным состоянием приповерхностных частей Земли; 4) существенное превышение (в 5 – 10 раз) современного теплового потока над величиной радиогенного тепловыделения, обусловленное большими запасами первичного тепла в земных недрах. Существуют и многие другие доказательства [8, 9].

Таким образом, приведённые результаты исследований однозначно свидетельствуют о формировании пород верхней мантии древних континентов путём глобального магматического фракционирования, происходившего в течение всей истории Земли. Этот вывод полностью согласуется с полученными ранее результатами расчётов, согласно которым фракционирование земного магматического океана продолжалось более 4 млрд лет [9].

#### Признаки гетерогенной аккреции Земли

Одной из наиболее дискуссионных проблем геологии является природа мощных сил, под влиянием которых происходят геологические процессы. Под воздействием этих сил дробились и раздвигались континенты, формировались и закрывались океаны, возникали

горные сооружения и глубокие впадины, извергались вулканы и появлялись магматические и рудные провинции. Причиной перемещений плит может быть только существование в мантии восходящих потоков (плюмов) вещества, подогретого земным ядром. Из этого следует, что ядро горячее мантии. Температурный перепад, оценённый в 700 – 3000 К, установлен геофизическими исследованиями [10]. Однако причина такого перепада температуры на границе мантии и ядра и очень высокой температуры последнего не находит объяснения с позиций

господствующей в геологии гипотезы гомогенной аккреции Земли. При таком происхождении одновременно выпадающие железные и силикатные частицы были бы первоначально перемешаны в земных недрах и поэтому имели одинаковую температуру. В дальнейшем силикатный материал разогревался в результате радиогенного тепловыделения. Железо, судя по составу метеоритов и вынесенных из земного ядра крупных блоков железа в некоторых основных породах [9], содержит на 2 – 3 порядка меньше радиоактивных элементов, чем мантийные породы. Поэтому оно не могло разогреваться, и температура ядра со временем должна была становиться ниже по сравнению с мантией. Следовательно, в последней не могло возникнуть тепловой конвекции. Неясность природы конвекции и некоторых других явлений привело многих зарубежных исследователей к отрицанию существования плюмов. Поэтому в настоящее время за рубежом происходит дискуссия под лозунгом: «А существуют ли мантийные плюмы?» [11]. Однако многочисленные геологические данные не позволяют от них отказаться.

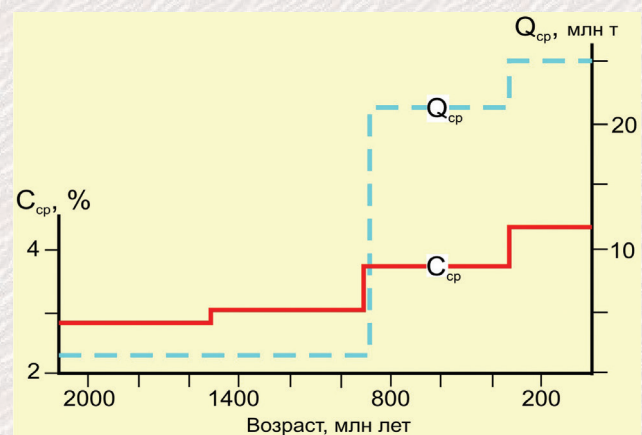
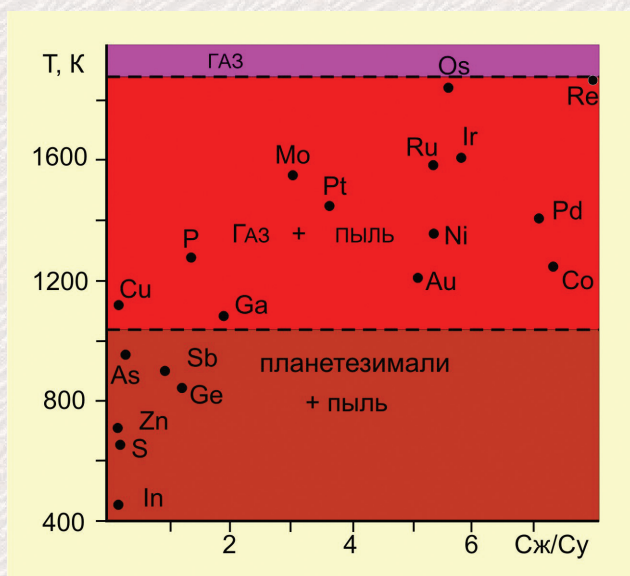


Рис. 9. Возрастание среднего содержания ( $C_{cp}$ ) и средних запасов ( $Q_{cp}$ ) редкоземельных элементов в карбонатитовых месторождениях в зависимости от их возраста [8].





**Рис. 10. Резкое снижение содержания в железных метеоритах примесей (Сж/Сж), имеющих температуру конденсации в протопланетном диске ниже точки Кюри (коричневое поле). Сж и Сж – содержание примесей соответственно в железных метеоритах и в предполагаемом исходном веществе планет [9].**

Очевидно, что невозможность объяснить природу тепловой конвекции в мантии обусловлена ошибочностью гипотезы гомогенной аккреции Земли, на основе которой рассматривается природа геологических процессов. Эта гипотеза не обоснована космохимическими и другими данными. Между тем еще в 1967 г. Харрис и Тозер [12] показали, что скорость объединения намагниченных в магнитном поле Солнца железных частиц была в двадцать тысяч раз выше скорости их слипания под воздействием гравитационного притяжения. Поэтому первыми под влиянием магнитных сил очень быстро объединялись железные частицы после их остывания в протопланетном диске ниже температуры Кюри (1043 К), при которой железо приобретает способность намагничиваться.

Это полностью подтверждается очень низким содержанием в основных типах железных метеоритов примеси элементов с низкой температурой конденсации, что свидетельствует о формировании их родительских тел диаметром в сотни километров сразу после достижения температуры Кюри для железа. Затем (коричневое поле на рис. 10) конденсировавшиеся в протопланетном диске элементы почти перестали растворяться в железе метеоритов, поскольку этому препятствовал большой размер тел железа. О ранней быстрой аккреции железных частиц свидетельствуют также высокая температура формиро-

вания материала родительских тел железных метеоритов (1180 – 1300 К) – ядер разрушившихся небольших планет [9] – и их обычно очень древний изотопный возраст – 4,5 – 4,4 млрд лет [13]. На основании этих данных Г. В. Войткевич [14] и В. С. Шкодзинский [9] пришли к заключению о том, что железные ядра планет земной группы сформировались раньше силикатных мантий и, следовательно, аккреция была гетерогенной. К такому же выводу на основании космохимических данных пришло большинство участников конференции по происхождению земного ядра, состоявшейся в Германии в 1994 г.

Импактный (ударный) разогрев ядра, формировавшегося путём объединения крупных тел железа, был намного больше, чем разогрев силикатной оболочки, образовавшейся при последующей медленной аккреции сантиметровых и метровых силикатных частиц. Это объясняется тем, что при падении крупных тел резко уменьшалась доля импактного тепловыделения, расходовавшегося на излучение [2]. По этой причине температура ядра была изначально выше, чем мантии, и в переходной зоне имел место её скачок. Он обусловил постоянный подогрев мантии ядром и существование в ней тепловой конвекции. Возникающие конвективные потоки вещества (плюмы), значительно наклонённые на запад в связи с существованием силы Кориолиса, обуславливают и в настоящее время высокую тектоническую и магматическую активность Земли, которая в отличие от Луны и Марса продолжает «бурлить».

#### Заключение

Таким образом, аккреция при образовании Земли была горячей и гетерогенной. Первым сформировалось её горячее железное ядро в результате быстрого слипания железных конденсатов протопланетного диска под влиянием, главным образом, магнитных сил. Затем под воздействием значительного гравитационного поля к ядру притягивались силикатные частицы, которые, падая на него, плавилась в результате импактного тепловыделения и сформировали глобальный океан магмы (рис. 11, 12). По мере аккреции его нижняя часть



**Рис. 11. Горячая аккреция Земли (www.kindaroomy.com).**





**Рис. 12. Примерно так выглядела поверхность Земли первые сотни миллионов лет после ее образования**  
(<http://zanzibar.ru/izverzhenie.vulkana-20-foto>).

кристаллизовалась под растущим давлением новообразованной верхней. Осаждавшиеся кристаллы и захороненные в них расплавы сформировали более холодные, чем ядро, породы мантии, а остаточные расплавы обогащали океан расплавофильными компонентами. Вследствие участия магнитных сил в аккреции, Земля образовалась значительно быстрее, чем предполагалось О. Ю. Шмидтом (более 1 млрд лет). Это согласуется с новейшими оценками длительности её формирования – около 10 млн лет [9]. После прекращения аккреции из богатой кремнекислотой верхней части океана образовалось большинство пород континентальной кристаллической коры, а из средней и нижней частей – породы верхней мантии континентов. Из ранних малоглубинных остаточных расплавов возникли характерные для континентов древние гранитоиды, из поздних глубинных – карбонатиты и кимберлиты [8].

Только горячее гетерогенное образование Земли позволяет объяснить многочисленные геологические загадки нашей планеты и свидетельствует о необходимости пересмотра с этих позиций главных представлений о природе эндогенных геологических процессов.

#### Список литературы

1. Шмидт, О. Ю. Происхождение Земли и планет / О. Ю. Шмидт. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.
2. Сафронов, В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет / В. С. Сафронов. – М. : Наука, 1969. – 244 с.
3. Snyder, G. A. Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution / G. A. Snyder, L. E. Borg, L. E. Nyquist, L. A. Taylor // *The origin of the Earth and Moon*. – Univ. of Ariz. Pres, 2000. – P. 361–395.
4. Магматические горные породы. Ультраосновные породы / Под. ред. О. А. Богатикова и др. – М. : Наука, 1987. – 368 с.
5. Wasch, L. J. Timing and natural of silica enrichment in the Kaapvaal lithosphere mantle / L. J. Wasch [et al.] // *9th International Kimberlite Conference. Extended Abstract*. – 2008. – No 91RC-A-00121.
6. Jacob, D. E. Eclogite xenolith from Kimberley, South Africa – a case study Mantle metasomatism / D. E. Jacob, K. S. Viljoen, N. Grossineau // *9th International Kimberlite Conference. Extended Abstract*. – 2008. – No 91RC-A-00160.
7. Шкодзинский, В. С. Генезис литосферной мантии древних платформ / В. С. Шкодзинский // *Отечественная геология*. – 2010. – № 6. – С. 27–32.
8. Шкодзинский, В. С. Генезис кимберлитов и алмаза / В. С. Шкодзинский ; Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Академия наук Республики Саха (Якутия). – Якутск : ОАО «Медиахолдинг Якутия», 2009. – 352 с.
9. Шкодзинский, В. С. Проблемы глобальной петрологии / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Сахаполиграфиздат, 2003. – 240 с.
10. Bukowski, M.S.T. Taking the core temperature / M. S. T. Bukowskii // *Nature*. – 1999. – № 6752. – P. 432–433.
11. Иванов, А. В. Обойдёт ли Россию «великий спор о плюмах»? / А. В. Иванов // *Геол. и геофиз.* – 2006. – Т. 47, № 3. – С. 417–420.
12. Harris, P. G. Fractionation of iron in the Solar system / P. G. Harris, D. C. Tozer // *Nature*. – 1967. – Vol. 215, № 5109. – P. 1449–1451.
13. Додд, Р. Т. Метеориты – петрология и геохимия / Р. Т. Додд. – М. : Мир, 1986. – 386 с.
14. Войткевич, Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли / Г. В. Войткевич. – М. : Наука, 1983. – 168 с.

**АРХИВ МУДРЫХ МЫСЛЕЙ**

**Вера, не просветлённая разумом, недостойна человека.**

**Пьер Абеляр**