

Рецепты сотворения МИРА

В. С. ШКОДЗИНСКИЙ

Рецепт дня:

- 75 пинт водорода;
- 23 пинты гелия;
- 1000 галлонов воды;
- пару бочек света;
- фунтик соли.

Все размешать ложкой и дать настояться.
Добавить астероидов и метеоритов по вкусу.
Оживить бокалом красного вина.
Bon Appetit!

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ
КАК ОСНОВА
ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ
ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Как формировалась наша планета из протопланетного газопылевого диска, окружавшего молодое Солнце? Какие процессы привели к образованию ее железного ядра? Каково происхождение Луны? Подкрепляя свою точку зрения геологическими данными, автор предлагает оригинальные гипотезы. Им обосновывается длительное, более 4 млрд лет, существование глобального океана магмы, в котором происходило разделение элементов, входящих в состав земных пород. Автором подчеркивается роль магнитных взаимодействий в протопланетном облаке, которые могли ускорить формирование железосодержащих планетных зародышей. Гетерогенная аккреция этих металлических метеоритов при участии магнитного взаимодействия могла сформировать железное ядро нашей планеты гораздо быстрее, чем это следует из общепринятых теорий фракционирования Земли. Высокая температура в ядре может быть объяснена импактным разогревом в процессе столкновения металлических зародышей

Вид таинственного звездного неба с древнейших времен привлекал внимание людей и заставлял их искать ответы на вопрос – как образовались небесные тела и Земля? Из-за недостатка эмпирических данных первые попытки ответить на него были мистическими и умозрительными. С развитием астрономии появилось все больше фактов и гипотезы становились все более обоснованными.

И сегодня остается много вопросов, связанных с происхождением Земли и планет, однако накопленная человечеством довольно значительная информация о геологическом строении Земли и других небесных тел позволяет говорить о возможности серьезной реконструкции генезиса нашей планеты.

К настоящему времени в результате наблюдений с помощью космического телескопа «Хаббл» открыто множество газопылевых туманностей, в которых зарождаются звезды, а вокруг некоторых из них обнаружены и планеты. Поэтому выдвинутая в XVIII в. Кантом и Лапласом небулярная гипотеза образования Солнечной системы путем гравитационного сжатия газопылевого облака может считаться в значительной мере доказанной. Согласно современным представлениям, рост давления и температуры в центральной части этого облака вызвал протекание в нем реакции образования гелия из водорода, что резко повысило ее температуру и привело к возникновению Солнца. Газопылевое облако в общем случае имело вращательное движение. Частицы с наибольшей скоростью вращения, вследствие влияния центробежной силы, почти не притягивались к центру облака и остались на его периферии. С этим могут быть связаны дискообразная форма остатков облака, и известный парадокс приуроченности 98 % вращательного момента солнечной системы к планетам, несмотря на то, что их масса составляет менее 1 % системы. Давление солнечного излучения обусловило перемещение большинства газов из окрестностей Солнца на окраину протопланетного диска и является причиной большого содержания газов в удаленных планетах – Юпитере, Сатурне, Уране.

В титульной композиции (слева) использовано фото газопылевого протопланетного диска, из которого миллиарды лет назад возникла наша Земля и планеты солнечной системы.
ESO / L. Calçada



ШКОДЗИНСКИЙ Владимир Степанович – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии литосферы и кимберлитов Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (Якутск). Сфера научных интересов: петрология магматических и метаморфических пород, космология и планетология. Автор и соавтор около 400 научных публикаций

Ключевые слова: генезис Земли, горячая и гетерогенная аккреция, магматический океан, радиоизотопное датирование.
Key words: genesis of Earth, hot and heterogeneous accretion, magmatic ocean, dating by radioactivity



По какому механизму происходило образование Земли – была ли аккреция холодной или горячей? Какой была интенсивность выделения тепла при аккреции, и как она влияла на скорость остывания формирующейся планеты? Существовал ли в начале образования планеты магматический океан? Или же Земля была холодной и твердой? У обеих точек зрения есть свои сторонники и свои противники

по В. С. Сафронову (Сафронов, 1969). При аккреции за счет преобразования механической энергии в тепловую выделилось около $23,2 \cdot 10^{38}$ эрг, что могло бы нагреть вещество Земли до $36\,000^\circ\text{C}$ и испарить его. Но большая длительность этого процесса, по мнению сторонников гипотезы холодной аккреции, обеспечила рассеивание выделявшегося тепла в космическое пространство. Кроме того, при изучении наиболее древних пород нашей планеты исследователям было удобно предполагать, что самые ранние геологические процессы существенно не отличались от современных (принцип актуализма). Поэтому гипотеза холодной аккреции Земли в настоящее время продолжает оставаться популярной, несмотря на то что она основана главным образом на результатах расчетов динамики слипания частиц под влиянием гравитационных сил и не учитывает роль магнитных сил и многие имеющиеся космохимические, изотопные и геологические данные.

Кроме того, результаты исследований Луны космонавтами во второй половине прошлого столетия пришли в противоречие с гипотезой холодной аккреции, поскольку неожиданно выявили признаки горячего образования этого небесного тела. На Луне отсутствуют хондриты (метеориты, имеющие близкий к Земле состав и содержащие хондры – сферические или эллиптические образования преимущественно силикатного состава). Ее породы имеют магматическое происхождение и очень древний (4,4–3,7 млрд лет) изотопный возраст. В лунных породах наблюдается намного большее, по сравнению с хондритами, содержание химических компонентов (оксидов железа и кремния, редкоземельных элементов), накапливавшихся в остаточных расплавах при кристаллизации магм. Это указывает на существование на ранней стадии эволюции Луны глобального океана магмы и его последующую дифференциацию (фракционирование). Особенно показательным присутствием на Луне слоя анортозитов мощностью 60–100 км. Эти редкие на Земле породы сложены в основном кальциевым алюмосиликатом плагиоклазом и формировались в результате выделения этого минерала из кристаллизующегося расплава. На Луне анортозитовый слой образовался путем всплытия плагиоклаза в магматическом океане глубиной

не менее 1000 км. Таким образом, новейшие данные противоречат гипотезе холодной аккреции планет земной группы и свидетельствуют об их горячем образовании, но дискуссия по этому вопросу еще продолжается.

Нерешенной является и проблема гомогенного или гетерогенного формирования Земли и других планет. По гипотезе гомогенной аккреции предполагается, что состав формировавшегося планеты вещества не изменялся во времени. Силикатные и железные частицы падали одновременно, в дальнейшем они разделялись в земных недрах в результате гравитационной дифференциации и сформировали железное ядро Земли, силикатные мантию и кору. Согласно гипотезе гетерогенной аккреции состав падавшего материала сильно эволюционировал во времени, что обусловило слоистое строение планет. Гипотеза гомогенного образования не нуждается в объяснении причины изменения состава падавшего материала, что объясняет ее популярность среди геологов. Однако, как будет показано ниже, ей противоречат некоторые теоретические, космохимические и геологические данные.

Таким образом, две важнейшие проблемы – холодного или горячего образования Земли и гомогенного или гетерогенного характера аккреции – до сих пор не имеют убедительного решения и нуждаются в проверке геологическими данными.

Была ли Земля при рождении однородной по составу? В случае однородной аккреции дифференциация внутреннего строения Земли происходила исключительно под воздействием высоких температур и давлений в ее недрах. Если же состав частиц, падавших на Землю, менялся со временем из-за происходящих в протопланетном диске процессов, планета с самого начала своего зарождения могла быть неоднородной

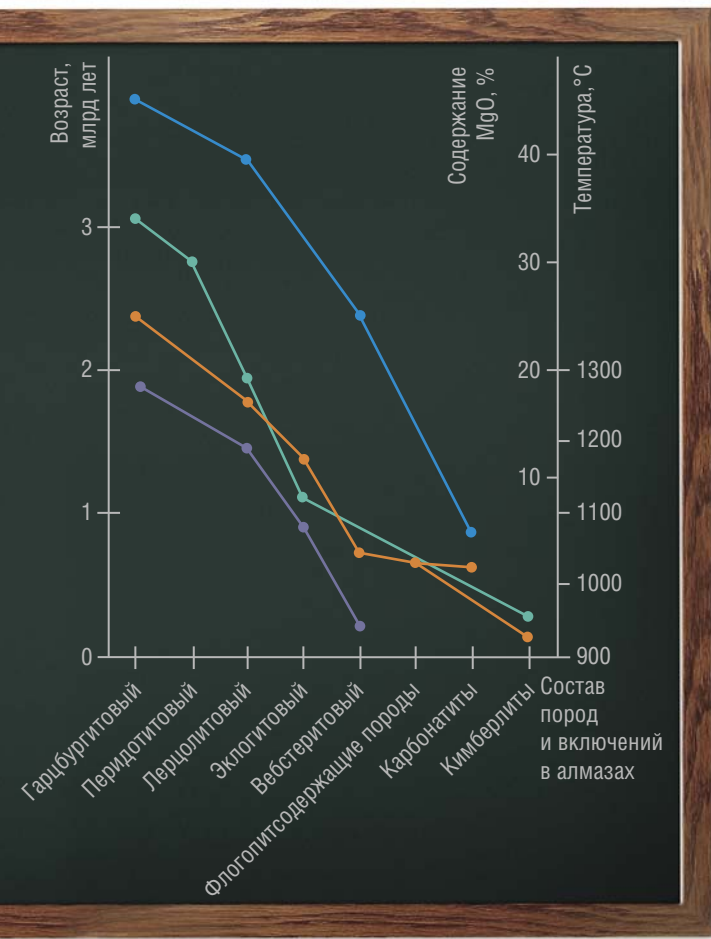
И все-таки она горячая!

Если Земля имеет горячее происхождение, на ней, как на Луне, существовал океан магмы, и происходила его дифференциация путем отделения кристаллизовавшихся минералов, то наиболее крупная земная оболочка – мантия – также должна сохранить признаки этой дифференциации. Судя по хорошо изученным природным дифференцированным магматическим телам, к таким признакам относятся эволюция состава формирующихся пород при остывании магм и существование закономерной возрастной и температурной

Холодное или горячее? Сразу или по порядку?

Существует четыре гипотезы – холодной, горячей, гомогенной и гетерогенной аккреции Земли и других планет (то есть рождения путем объединения частиц протопланетного облака). Согласно первой, формировавшие Землю частицы были холодными (Шмидт, 1962). Их слипание происходило под влиянием гравитационных сил и было очень длительным – более 1 миллиарда по О. Ю Шмидту и 100 миллионов лет

Звезды и планеты возникли из газопылевых облаков, подобных облаку с зарождающимися звездами в туманности Карина.
NASA, ESA, and M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team (STScI)



Возраст пород коррелирует с температурой их образования и содержанием оксида магния. Указанные на графике породы образовывались последовательно в процессе остывания мантии. Аналогичная корреляция наблюдается для микровключений в алмазах. Приведены сводные данные о возрасте различных пород из ксенолитов в кимберлитах: средний изотопный возраст пород, включений в алмазах, средняя температура образования при 5 ГПа, среднее содержание MgO.
По: (Шкодзинский, 2011)

В глубинах магматического океана под воздействием высокой температуры и давления происходило фракционирование минералов, слагавших молодую Землю. Составляющие ее вещество элементы перераспределялись – часть из них, сродственная железу, выделялась в расплав и уходила в ядро планеты, другая же часть оставалась в силикатном слое расплавленной магмы

последовательности их образования. В остывающих богатых магнием магматических телах в результате осаждения последовательно кристаллизовавшихся различных минералов сначала формировались дуниты (наиболее высокотемпературные породы, очень богатые магнием), затем гарцбургиты (менее магнезиальные породы), далее – лерцолиты (содержащие значительное количество железа) и вебстериты (с повышенным количеством кальция и натрия). Далее расплав эволюционировал по составу до богатого кремнекислотой и щелочами гранитного. В характерных для мантии условиях высокого давления остаточный расплав должен был изменяться до богатого кальцием эклогитового, затем до карбонатитового и кимберлитового, содержащих также много углекислоты. Все перечисленные выше породы слагают ксенолиты (случайно захваченные магмами обломки) мантийных пород в кимберлитах, что подтверждает образование верхней мантии путем глобального магматического фракционирования.

Если мантийные породы сформировались в результате фракционирования, то их изотопный возраст должен уменьшаться в приведенной выше последовательности

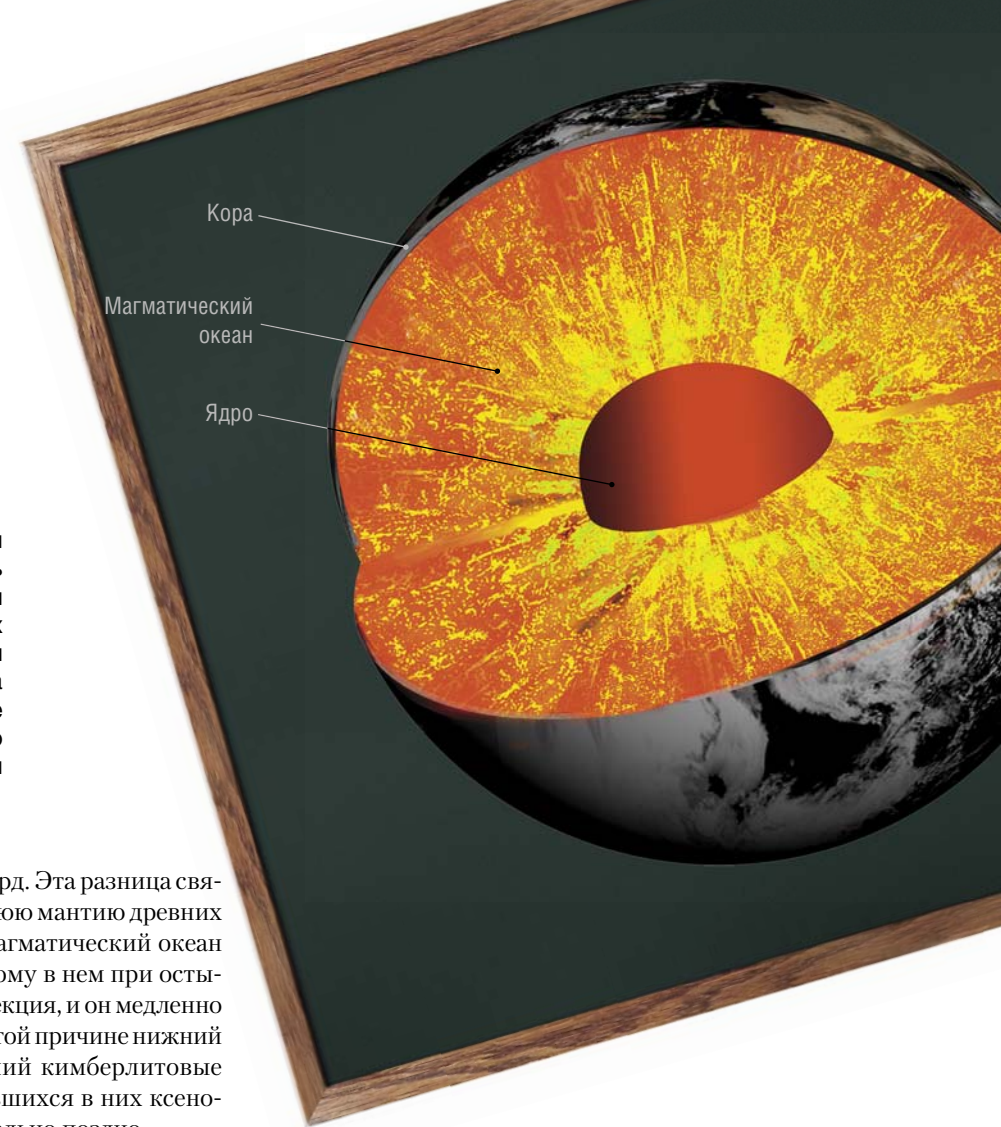
образования. Известные на сегодняшний день данные подтверждают эту гипотезу. Средний изотопный возраст оказался равным для дунитов + гарцбургитов – 2,325 млрд лет; для лерцолитов – 1,777 млрд; для вебстеритов – 0,713 млрд. Возникшие из остаточных расплавов эклогиты имеют средний возраст 1,407 млрд лет; карбонатиты – 0,688 млрд лет; кимберлиты – 0,236 млрд лет. Это согласуется с полученным средним возрастом включений в кристаллизовавшихся в процессе фракционирования алмазах: 3,03 млрд лет для гарцбургитовых по составу; 2,777 млрд – для перидотитовых (нерасчлененных гарцбургитовых + лерцолитовых); 1,966 млрд – для лерцолитовых; 1,123 – для эклогитовых и 0,357 – для кимберлитовых. Обращает на себя внимание чаще всего несколько более древний возраст включений в алмазах по сравнению с возрастом одноименных пород. Такое различие вполне закономерно и обусловлено защитной ролью прочнейшего алмазного вещества, предохранявшего самые ранние минералы от частичного растворения наиболее неравновесным с ними поздним остаточным расплавом. Земля имеет возраст около 4,65 млрд лет, а наиболее древние вклю-

В процессе эволюции Земли первым образовалось металлическое ядро путем слипания намагниченных железных частиц. Силикатная мантия и кристаллическая кора возникли позже в процессе фракционирования глобального океана магмы

чения в алмазах – в среднем 3,03 млрд. Эта разница связана с тем, что образовавший верхнюю мантию древних континентов постаккреционный магматический океан был расслоенным по составу. Поэтому в нем при остывании не возникла обширная конвекция, и он медленно кристаллизовался сверху вниз. По этой причине нижний слой этого океана, сформировавший кимберлитовые расплавы и большинство содержащихся в них ксенолитов, начал затвердевать сравнительно поздно.

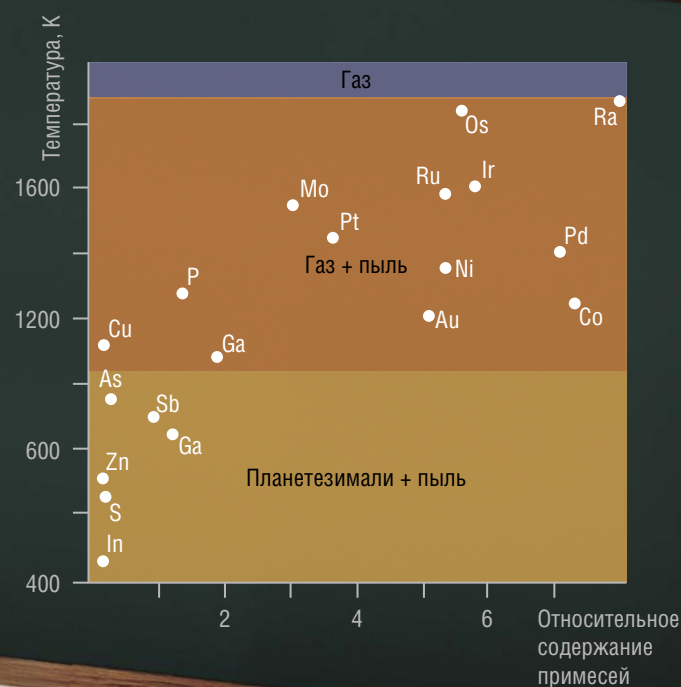
Если породы мантийных ксенолитов в кимберлитах являются продуктом магматического фракционирования, то температура формирования их минералов должна снижаться от гарцбургитов к эклогитам и далее к вебстеритам. В настоящее время существует ряд оценок условий кристаллизации мантийных пород. Обобщая данные различных авторов, можно заключить, что при достаточно большом давлении, 5 ГПа (на глубине около 150 км), температура образования указанных пород составляла 1275, 1190, 1075 и 950 °C соответственно. То есть, средняя температура кристаллизации действительно понижалась от ранних дифференциатов к поздним в полном соответствии с последовательностью образования этих пород в процессе магматического фракционирования.

При фракционировании в остаточных расплавах резко понижалось содержание окиси магния, вследствие выноса ее кристаллизовавшимися минералами. Поэтому количество ее должно сильно уменьшаться от ранних дифференциатов к поздним. 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 вебстеритах



с возрастом 0,730 млрд лет – 25,5 %, в карбонатитах с возрастом 0,65 млрд лет – 4,0 %.

Таким образом, приведенные результаты исследований однозначно свидетельствуют о формировании литосферы древних платформ (наиболее жесткой и холодной их части толщиной до 300 км) путем глобального магматического фракционирования, протекавшего в течение всей истории Земли. Этот вывод полностью согласуется с полученными ранее результатами расчетов, по которым фракционирование земного постаккреционного магматического океана продолжалось более 4 млрд лет. Гипотезу горячего образования Земли также подтверждают многочисленные признаки остывания мантии (повсеместное замещение высокотемпературных минералов низкотемпературными в ксенолитах из кимберлитов) и земной коры (постепенная смена пластических деформаций коры хрупкими). Повышенное содержание в поздних алмазах азота и легкого изотопа углерода указывает на накопление этих компонентов в остаточных расплавах при глубинном фракционировании. Отсутствие в земной коре пород древнее 4 млрд лет и следов завершившей аккрецию массовой



Если ядро Земли сформировалось путем выделения железа из однородного по составу вещества, то оно должно было содержать меньше радиоактивных элементов, чем мантия. Поэтому его разогрев путем радиоактивного распада был менее интенсивен и температура в ядре должна быть ниже температуры мантии. Однако это не так, и, следовательно, гипотеза гомогенной аккреции противоречива

Нормированное к углистым хондритам среднее содержание в железных метеоритах примесей резко понижается с уменьшением их температуры конденсации.
По: (Шкодзинский, 2003)

метеоритной бомбардировки можно объяснить тем, что приповерхностные части Земли длительное время находились в расплавленном состоянии. Кроме того, тот факт, что современный тепловой поток из недр планеты значительно превышает (в 5–10 раз) величину возможного радиогенного тепловыделения, указывает на большие запасы первичного тепла в земных недрах.

Признаки гетерогенной аккреции Земли

Наиболее крупным достижением геологической науки прошлого столетия является получение убедительных доказательств существования грандиозных перемещений литосферных плит. В результате этого дробились и раздвигались континенты, появлялись и исчезали океаны, возникали горные сооружения и глубокие впадины, происходили извержения вулканов и формировались магматические и рудные провинции. Причиной огромных перемещений плит является существование в мантии восходящих потоков (плюмов) вещества, подогретого земным ядром. Из этого следует, что ядро должно быть горячее мантии и между ними существует температурный перепад. Последний обнаружен геофизическими исследованиями (Bukowinski, 1999), величина его оценена в 700–3000 К.

Однако причина скачка температуры на границе мантии и ядра и очень высокой температуры последнего совершенно не находит объяснения с позиций господствующей в геологии гипотезы гомогенной аккреции Земли. При гомогенном формировании планеты железные и силикатные частицы первоначально были перемешаны в земных недрах, имели одинаковую температуру и должны были выпасть одновременно. В дальнейшем силикатный материал разогревался в результате радиогенного тепловыделения. Железо, судя по составу метеоритов и вынесенных из земного ядра крупных блоков железа в некоторых базальтах, содержит на 2–3 порядка меньше радиоактивных элементов, чем мантийные породы. Поэтому оно не могло разогреваться, и температура ядра могла бы быть даже меньше, чем мантии. Следовательно, в последней не возникла бы тепловая конвекция. В связи с неясностью природы конвекции и некоторых других явлений, многие зарубежные исследователи отрицают существование плюмов, и в настоящее время за рубежом происходит дискуссия под лозунгом «А есть ли мантийные плюмы?» (Иванов, 2006). Но представления об их существовании настолько хорошо согласуются с геологическими данными, что следует искать другую причину возникших затруднений. Скорее всего, противоречия возникают из-за того, что гипотеза гомогенной аккреции ошибочна.



Согласно гипотезе мегаимпакта, Луна образовалась после соударения Земли с небесным телом, по размерам сопоставимым с Марсом, из выброшенных на орбиту пород

Наличие магнитного взаимодействия между ферромагнитными частицами протопланетного диска могло привести к ускоренному формированию в нем крупных тел, состоящих преимущественно из железа. Эти железные частицы и объекты могли впоследствии сформировать и ядро Земли по механизму гетерогенной аккреции

Эта гипотеза обычно не обосновывается эмпирическими данными. Между тем, еще в 1967 г. Харрис и Тозер показали, что скорость объединения намагниченных в магнитном поле Солнца железных частиц в двадцать тысяч раз выше скорости их слипания под воздействием гравитационного притяжения. Железные частицы очень быстро объединялись под влиянием магнитных сил после остывания в протопланетном диске ниже температуры Кюри (1043 К), при которой железо приобретает намагниченность. Это полностью подтверждается очень низким содержанием в главных типах железных метеоритов примеси элементов с низкой температурой конденсации, что свидетельствует о формировании их родительских тел диаметром в сотни километров при высокой температуре диска (порядка 1000 К, то есть сразу после достижения температуры Кюри для железа). После достижения этой температуры конденсировавшиеся в протопланетном диске элементы почти перестали растворяться в железе метеоритов, что указывает на объединение железных частиц к этому времени в крупные тела. На основании этих данных ряд исследователей пришли к заключению, что железные ядра планет земной группы сформировались раньше силикатных мантий и, следовательно, аккреция была гетерогенной.

Возникший в результате выделения энергии ударений импактный разогрев при формировании ядра путем объединения крупных тел железа был

на несколько порядков больше, чем при последующей медленной аккреции сантиметровых – метровых силикатных частиц и формировании мантии, так как при слипании крупных тел резко уменьшалась доля импактного тепловыделения, расходованная на излучение. Это полностью объясняет возникновение скачка температуры при переходе от ядра к мантии и существование в последней тепловой конвекции.

Таким образом, образование Земли происходило путем горячей и гетерогенной аккреции. Первым сформировалось ее горячее железное ядро в результате быстрого слипания железных конденсатов протопланетного диска под влиянием главным образом магнитных сил. Затем под воздействием значительного гравитационного поля ядра притягивались силикатные частицы, которые плавилась в результате импактного тепловыделения и сформировали глобальный океан магмы. По мере аккреции его нижняя часть кристаллизовалась под влиянием роста давления новообразованных верхних частей. Осаждавшиеся кристаллы и захороненные в них расплавы сформировали более холодные, чем ядро, породы нижней мантии, а остаточные расплавы обогащали океан расплавофильными компонентами. Вследствие участия магнитных сил в аккреции Земля сформировалась значительно быстрее, чем предполагалось О. Ю. Шмидтом, что согласуется с некоторыми новейшими оценками длительности ее образования около 10 млн лет (Шкодзинский, 2003). После прекращения аккреции магматический океан имел глубину в среднем около 240 км. Из богатой кремнекислотой верхней его части сформировалось большинство пород континентальной кристаллической коры, а из средней и нижней части – породы верхней мантии древних платформ. Из ранних малоглубинных остаточных расплавов возникли характерные для платформ древние гранитоиды, из поздних – карбонатиты и кимберлиты.

КОММЕНТАРИЙ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

В работе В. С. Шкодзинского рассматривается оригинальная теория образования Земли, основанная на идее о том, что магнитные взаимодействия могли привести к быстрому формированию металлического ядра из железных метеоритов. Гипотеза гетерогенной аккреции действительно становится наиболее распространенной гипотезой образования Земли, но несколько не в том варианте, который предполагает автор. Считается вероятным, что формирование Земли началось с накопления более тяжелого и восстановленного материала, а продолжалось путем аккреции более окисленного материала, богатого летучими компонентами. Быстрое накопление металлического железа благодаря магнитным взаимодействиям маловероятно. Магнитное поле Земли появилось по мере роста жидкого железного ядра и возникновения в нем интенсивной конвекции, и усилилось около 3,3 млрд лет назад после выделения внутреннего твердого ядра.

Большинство исследователей признает существование «магматического океана» в верхней части мантии толщиной около 700 км на ранней стадии Земли. Но вопрос о его длительном существовании из-за отсутствия в нем конвекции является спорным. В настоящее время в частично расплавленной астеносфере (1–5 % расплава на глубине 100–400 км) существует интенсивная конвекция. Астеносфера, судя по изотопным данным, существует более 3 млрд лет. Тектоника плит и восходящие от границы ядро-мантия мантийные плюмы, существуют, по крайней мере, с позднего архея (т. е. последние 3 млрд лет), что тоже говорит в пользу существования конвекции в мантии. Поэтому «расчеты, по которым фракционирование земного постаккреционного магматического океана продолжалось более 4 млрд лет», выглядят неубедительно.

Академик Н. Л. Добрецов

Постоянный подогрев мантии земным ядром обусловил образование в ней сильно наклоненных на запад (в связи с воздействием силы Кориолиса) потоков горячего вещества, которые приводят к высокой современной тектонической и магматической активности Земли. Очень небольшая масса ядра Луны и поэтому небольшие запасы тепла в ее недрах являются причиной прекращения на ней магматических процессов около 3,1 млрд лет назад.

Анализ геологических данных вполне определенно свидетельствует об ошибочности гипотезы холодного гомогенного образования Земли и о справедливости представлений о формировании ее путем горячей гетерогенной аккреции. Только такое происхождение объясняет многочисленные геологические парадоксы и загадки нашей планеты (Шкодзинский, 2003). Достоинством модели горячей гетерогенной аккреции является основанность ее на анализе конкретных геологических и космохимических данных, что позволяет в значительной мере избежать умозрительности, характерной для ранних гипотез. Постепенное накопление фактов не только в астрономии, но и в геологии, приближает нас к познанию, казалось бы, самых таинственных процессов далекого прошлого.

Литература

- Войткевич Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли. М.: Наука, 1983. 168 с.
- Иванов А. В. Обойдет ли Россию «великий спор о плюмах»? // Геол. и геофиз. 2006. Т. 47. № 3. С. 417–420.
- Кларк С. П., Турекьян К. К., Гроссман Л. Модель ранней истории Земли // Природа твердой Земли. М.: Мир, 1976. С. 9–22.
- Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная причина. М.: Научный мир, 2009. С. 520.
- Шкодзинский В. С. Природа различного содержания азота в алмазах // Записки РМО. 2011. Ч. СХХХХ. № 6. С. 113–118.
- Шкодзинский В. С. Проблемы глобальной петрологии. Якутск: Сахаполиграфиздат. 2003. 240 с.
- Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 1962. 132 с.
- Bukowinski M. S. T. Taking the core temperature // Nature. 1999. N 6752. P. 432–433.
- Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // Nature. 1967. V. 215. N 5109. P. 1449–1451.
- Kelly W. R., Larimer J. W. Chemical fractionations in meteorites. VIII. Iron meteorites and the cosmochemical history of the metal phase // Geochim at Cosmochim Acta. 1977. V. 41. N 1. P. 93–112.
- Wasch L. J., Van der Zwaan F. M., Davies G. R. et al. Timing and natural of silica enrichment in the Kaapvaal lithosphere mantle // 9th International Kimberlite Conference. Extended Abstract. 2008. No 91RC-A-00121.

