

I. ОБЩАЯ, ИСТОРИЧЕСКАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

С.Г.Паняк

ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ: ГЕОЛОГО-АСТРОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

УДК 523.52

Многие проблемы геологии ранней Земли тесно увязаны с особенностями ее эволюции на переходном этапе от астрономического к геологическому периоду исторического развития. Астрономия постоянно подвергает свои экспериментальные наблюдения количественному физико-математическому контролю, геология, к сожалению, базируется на нередко разрозненных качественных наблюдениях, не позволяющих ограничивать научную фантазию. До определенной степени это обстоятельство объективно, однако в геологии в настоящее время делаются безуспешные попытки построения реперных моделей, когда при помощи физико-математических расчетов определяются пределы возможных колебаний геологических представлений.

Физико-математическое моделирование накладывает серьезные ограничения, прежде всего, на химический состав и агрегатное состояние протопланетного вещества, а следовательно и на химию Земли в целом. Не выдерживают критики некогда доминировавшие представления, заложенные акад. А.П.Виноградовым, о метеоритном составе первичного планетного вещества. Некоторые последователи этой идеи дошли до того, что геохимическую специфику крупнейших сегментов внешней оболочки Земли объясняют тем, что наша планета была сформирована из нескольких крупных астероидов, различающихся по химическому составу [3].

Представители астрономической науки сочли бы подобные идеи некомпетентной наивностью, т.к. самые грубые расчеты, увязывающие массу аккрецируемых частиц в процессе образования компактных космических тел, жестко ограничивают вес элементарного "кирпичика". Для Земли, например, после некоторых упрощений эта масса "m" увязывается с температурой уравнением

$$T=10^{26} \cdot m$$

Так как по самым разным оценкам температура в центре Земли не превышала 10^3-10^4 °С, то масса элементарного "кирпичика" должна приближаться к массе атомарного водорода ($1,67 \cdot 10^{-24}$ г). Представления о пылевидной туманности, сохраняющиеся со времен Канта, на самом деле не могут рассматриваться как реальные. Ничего общего с пылью, а тем более с астероидами и метеоритами, аккрецируемое вещество иметь не может. Расчеты показывают, что вес элементарных "кирпичиков" должен приближаться к так называемому "космическому соотношению", в котором доминирующую роль играют водород и гелий с некоторой долей более тяжелых элементов. Это обстоятельство ставит нашу планету в один ряд с другими телами Вселенной. А существование твердых планет типа Земли и газовых типа Юпитера - результат определенной эволюции, о которой речь пойдет ниже.

Из упомянутого ограничения вытекает неизбежное следствие: на астрономическом отрезке своей эволюции Земля проходила стадию газового шара. Несколько повышенное содержание в нем

тяжелых элементов по сравнению с "космическим соотношением" не исключительно по известным причинам, обуславливающим общую тенденцию утяжеления удельного веса первичного газового облака по направлению к Солнцу*. В таком протопланетном газовом шаре, радиус которого для Земли как минимум был около 10 тыс.км (с плотностью около 1 г/см³, как у других планет типа Юпитера), средняя температура может быть получена из уравнения

$$T = GMm/2kR ,$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса планеты, m - масса аккрелируемых частиц (около 2 · 10²⁴ г), k - постоянная Больцмана, R - радиус газового шара.

В этом случае средняя температура составит несколько тысяч градусов, а при дальнейшем уплотнении до современного состояния возрастет в несколько раз.

На порядок выше температура в центре такого газового шара (около 20 тыс.градусов), которая рассчитывается с учетом плотности ρ :

$$T = 4\rho GM/AR ,$$

где A - универсальная газовая постоянная.

Очевидно, что при увеличении массы аккрелируемой частицы на два-три порядка по отношению к атому водорода температура превысила бы 10⁶ градусов, т.е. такое тело стало бы звездой, вышло бы на так называемую "главную последовательность" с термоядерным синтезом в ядре. Расчеты показывают, что при существенно водородном составе газа компактные тела с массой больше 0,08 М_☉ (массы Солнца) достигают в центре температуры около 8 · 10⁶ градусов, когда начинается термоядерный синтез, определяющий начало звездной эволюции на "главной последовательности". При массе газового шара менее 0,08 М_☉ протекает планетная эволюция с гравитационным источником энергии.

Интересные выводы вытекают из дальнейшего анализа эволюции планетных тел. В соответствии с уравнением состояния (формулой Клапейрона) получаем связь температуры газового шара и его давления:

$$P = A/\mu(\rho T) = NkT ,$$

где μ - молярная масса, ρ - плотность, N - число Авогадро. Одновременно рассчитывается гравитационное давление в центре шара:

$$P_g = 3GM^2/\pi R^4 .$$

Сопоставление силы гравитационного сжатия и теплового расширения приводит к некоторым важным выводам.

По мере увеличения массы космического тела гравитационное сжатие постепенно начинает доминировать над тепловым расширением. Известен феномен гравитационного коллапса для массивных звезд, в результате которого по мере расходования внутренней энергии звезда может испытать имплозию (коллапс) с образованием нейтронных звезд (пульсаров) и черных дыр.

На планетном уровне, когда доминирует энергия сжатия, по мере уменьшения массы тела гравитация, как оказалось, не способна надежно удерживать легкие компоненты газового шара. Для Земли, например, гравитация и тепловое расширение очень близки и составляют около 10¹¹ дин/см². Некоторое превышение гравитации Земли над тепловым расширением не способно удерживать водород во всем диапазоне скоростей, что влечет за собой постепенную потерю этого элемента. В то же время для Юпитера имеется надежное перекрытие гравитационного сжатия над тепловым расширением, что позволяет сохранять водород в полном объеме. Сброс протуберанцев на Солнце

* Аналогичное "утяжеление" отмечается в системах спутников с приближением к материнским планетам.

Формируется конвекцией и реакциями термоядерного синтеза, способного поддерживать яркость нашей звезды на протяжении 10^{10} лет.

Таким образом, для небольших космических тел с массой, близкой к массе Земли, появляется проблема удержания легкой фракции газового шара. В таких условиях начинается разделение планет на две группы: существенно водородного состава типа Юпитера и каменных типа Земли.

Касаясь аналогичных проблем формирования и эволюции Земли, акад. А.А.Маракушев [4] приходит к очень близким выводам. Его построения, базирующиеся на преимущественно петрографическом материале и новейших данных космической геологии, позволили выдвинуть кометную гипотезу происхождения планет. В соответствии с ней состав исходного вещества для формирования планет был флюидным, газовым, близким по химическому составу к современным кометам, а не метеоритам, которые являются продуктом планетной эволюции. Касаясь различия каменных планет типа Земли и газовых типа Юпитера, А.А.Маракушев полагает, что потеря флюидных оболочек у каменных планет связана с эволюцией Солнца, достигшего стадии τ Тельца, когда резко возросла его светимость. При этом, по А.А.Маракушеву, "флюидные оболочки внутренней зоны мигрировали и возникли планеты земной группы". Физический смысл понятия "мигрировали" в данном случае несколько расплывчатый. Представляется, однако, что потеря флюидных оболочек обусловлена относительно высоким тепловым расширением планет с малой массой.

Ранее автором были созданы модели тепловой эволюции Земли (рис.1) в результате аккреции с использованием уравнения Хаббарда [7]. Кроме того, была рассчитана модель сепарации химических элементов в процессе аккреции на протопланетной стадии до гравитационной дифференциации. Интегрированием распределения Максвелла получено уравнение для определения некой величины β , отражающей относительное число частиц, кинетическая энергия которых меньше потенциальной энергии удаления этих частиц в бесконечность, т.е. способных к "миграции" на формирующееся и растущее ядро Земли (рис.2).

Величина β достигает для водорода 0,5 лишь при величине радиуса 0,4 т.е. в пределах современной верхней мантии. Этот вывод может служить основанием для утверждения о том, что планеты земной группы наращивали свой объем в атмосфере водорода и гелия за счет сепарации атомов более тяжелых элементов. При этом аккрецируемое вещество не испытывало существенной дифференциации, что вытекает из близости параметра β для магния и железа. Таким образом, уже в процессе аккреции Земля приобрела некоторую расслоенность.

Ряд неопределенностей возникает у исследователей при использовании математической модели скорости аккреции Хаббарда (1987). По этой модели (рис.1) рост температуры по мере увеличения радиуса Земли зависит от принятия главного условия: величины начальной температуры облака. Одно из решений описывает модель "холодной" аккреции, а другое - "горячей". Из приведенных выше расчетов, показывающих среднюю температуру сжатого протопланетного облака, вытекает возможность исключения из внимания "холодной" модели аккреции.

Такие шаровые скопления, разогретые до 10^3 - 10^5 градусов в результате первоначального сжатия, способны сравнительно быстро терять часть тепла вследствие интенсивной конвекции. Даже Солнце в другие т.н. молодые звезды до стадии τ Тельца проходят сравнительно кратковременный путь (10^6 лет), пока не выйдут на "главную последовательность", когда меняется источник энергии на более длительный (10^{10} лет). В планетах длительное термостатирование после аккреции

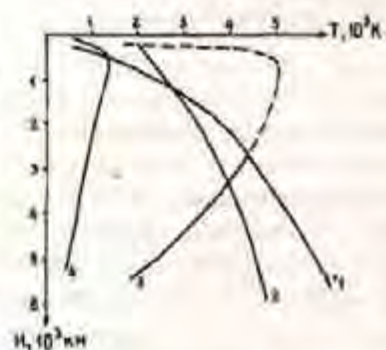


Рис.1. Кривые распределения температур:
1 - адiabатической, 2 - плавления железа, 3 - по модели горячей, 4 - холодной аккреции, но до формирования ядра. Пунктирная линия - область неопределенности

обеспечивается дифференциацией недр. Отсутствие возможностей масштабной конвекции в планетах земной группы позволяет им сохранять тепловой баланс на протяжении 10^{10} лет.

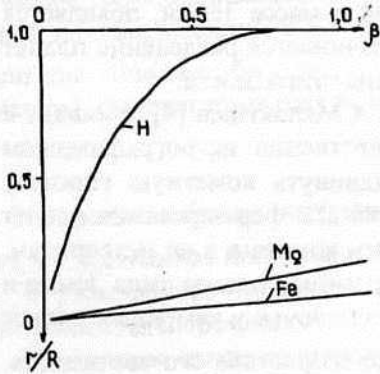


Рис.2. Сепарация химических элементов в процессе аккреции до гравитационной дифференциации

Вызывает некоторое удивление сохранность значительного количества тепла в планетах типа Юпитера, которые испытывают глобальную конвекцию. Этот факт является дополнительным свидетельством корректности физико-математических моделей утверждающих, что первоначальные температуры в недрах сжатого протопланетного газа (Юпитера) были, по крайней мере, на порядок выше современных (20 тыс.градусов).

А.А.Маракушев увязывает формирование спутниковых систем планет с образованием их каменных ядер. Сопоставление вулканически активного спутника Юпитера Ио с очень близкой многим физическим параметрам и давно "потухшей" Луной приводит А.А.Маракушева к предположению о том, что спутники Юпитера очень молоды, а значит, формирование каменного ядра этой планеты задержалось на несколько миллиардов лет. Вопрос остается спорным. Энергоемкость пород Луны и сегодня удивляет ученых, а продукты вулканизма на ней - высокотемпературные базальтовые лавы. На Ио извергаются преимущественно сернистые соединения. Кроме того, несомненную роль в поддержании

вулканической активности Ио играет приливное трение, вызванное близостью к Юпитеру. Гравитационные воздействия Луны на Землю и, наоборот, Земли на Луну общеизвестны. Эти экзотергическим источником объясняется наиболее ранний вулканизм на Земле и ее спутнике обеспечивающий приповерхностное плавление обоих тел на протяжении первых полутора миллиардов лет их эволюции. С учетом того, что массы, плотности, размеры и расстояния Ио и Луны до материнских планет сопоставимы, в рассуждениях А.А.Маракушева упущен весьма важный для последствий термической истории спутника Юпитера параметр - масса последнего, которая превышает земную в 318 раз. Удаляющаяся от Земли Луна испытывала мощное приливное трение способное разогреть внешнюю оболочку до расплавления на значительно более коротком, чем Ио расстоянии, а по мере удаления ее вулканическая активность угасала. Предварительные расчеты показывают, что современная вулканическая активность на ближайшем к Юпитеру спутнике - Ио вполне может быть обусловлена энергией приливного трения. Следы тектонической активности фиксируются даже на следующем и более удаленном от Юпитера спутнике - Европе. Ледяная корка на этом спутнике несет следы подвижек активной и сравнительно теплой коры в виде разветвленной системы трещин. В подножье ледяной коры полагают наличие жидкой воды с возможными следами жизни.

Источник вещества для образования планет и их спутниковых систем требует дополнительных расчетов. Не исключено, что те 0,2 % массы Солнца, необходимые для формирования планет, были выброшены из звезды при прохождении им стадии τ Тельца. Ведь расчетная температура после гравитационного сжатия звезды достигала 50-60 млн градусов, в то время как сегодня она лишь несколько превышает 10 млн.градусов. По предварительным оценкам выделившейся энергии достаточно для придания планетам необходимого момента количества движения, поиск которого тормозит сегодня космогонические построения.

Планетные системы, как показывают расчеты, также проходят своеобразную стадию τ Тельца в момент максимального сжатия. Приведенные в начале статьи температуры в центральных частях газовых шаров минимальны, они рассчитаны для существенно разреженного состава облака. Если допустить участие молекул других более тяжелых газов (согласно кометной гипотезе

А.А. Маракушева), то эти температуры возрастут на порядок, а общей энергии станет достаточно для формирования спутниковых систем.

Одной из проблем, возникающих при подобных построениях, является поиск источника образующихся в ядрах звезд тяжелых элементов, изобилиующих в планетных системах и их спутниках. В этом случае обычно утверждается, что Солнечная система унаследовала при своем формировании обогащенное тяжелыми элементами облако - продукт взрыва "сверхновой" звезды, а наше Солнце - звезда второй генерации. Однако при любых механизмах "смерти" звезд остается компактный остаток: белый карлик, пульсар, черная дыра. Подобных объектов в ближайших окрестностях не обнаружено.

Признавая существенную роль вспышек на стадии τ Тельца, можно было бы полагать их решающую роль в формировании планетных систем и их спутников. Модель А.А. Маракушева, согласно которой спутниковые системы образуются как следствие формирования каменных ядер, имеет право на существование, но содержит ряд противоречий. По мере роста каменных ядер планет температура их возрастает и для Земли может превышать 5 тыс. градусов. Однако, если для газовых объектов известна теория ударных волн, способных выбрасывать в космическое пространство значительные массы таких объектов, то для планетной эволюции ее использовать трудно. Нынешняя атмосфера и гидросфера Земли несомненно не представляют собой реликта протопланетного облака. Они являются продуктом более поздней дегазации недр планеты, а начиная с 3,5 млрд лет, их состав в существенной степени испытал влияние живого вещества на Земле. До этого времени существовала только атмосферная оболочка с подавленным потенциалом кислорода, а палеоклиматические условия напоминали обстановку на современной Венере. Известный феномен безградиентного гранулитового метаморфизма, характерный для пород раннего докембрия, обусловлен именно такими поверхностными условиями на нашей планете.

Если палеогеографическая обстановка ранней Земли напоминала венерианскую, то геологическая - лунную. Несложные расчеты показывают, что массовый вулканизм Луны, поддерживаемый земным приливным трением, мог существовать ограниченное время, пока Луна находилась за пределом Роша на расстоянии, в несколько раз меньшем, чем сегодня. Сегодня она движется со скоростью около 3 см в год. Специфику петрографического состава (наличие минеральных анортозитовых пород) на Луне трудно объяснить за рамками модели системы Земля - Луна. Только в условиях длительного термостатирования, обусловленного взаимодействием планеты и ее спутника, возможна массовая сепарация полевошпатового компонента из базальтового расплава. Однако, если глубина расплавленной оболочки Луны, по данным Дж. Вуда [1], достигала 200 км, то на Земле она составила всего 50-60 км [2].

Изучение геохимических тенденций при формировании древнейших генотипических структурно-вещественных комплексов с последующим моделированием их петрохимической динамики показало, что вертикальный временной ряд последовательных образований вплоть до гранитоидов мог быть образован за счет протокрысы базальтового состава. В этом ряду последовательно выделяются анортозитовая (4,6-4,2 млрд лет), эндербит-чарнокитовая (4,2-3,6 млрд лет), тоналитовая (3,6-3,0 млрд лет) и гранитоидная (3,0-2,6 млрд лет) стадии [6].

В участках, где процессы всех четырех стадий были телескопированы, сформировался гранитный слой в том виде, в каком мы имеем возможность наблюдать его в кристаллических щитах так, где архейские образования не претерпели существенной активизации. В связи с постепенным сокращением площадей петрогенетических преобразований различных стадий отмечается латеральная неоднородность состава древнего "гранитного" слоя с реликтами продуктов предыдущих стадий.

В заключение приведем несколько общих замечаний. Под влиянием новейших данных космохимической геологии, с одной стороны, а также физико-математических моделей [5,6], ограничивающих рамки возможных построений, - с другой, сегодня созданы возможности для прорыва в области космогонических теорий формирования Земли и Солнечной системы в целом. Среди существующих гипотез, в максимальной степени учитывающих новейшие данные космохимической

геологии и менее других противоречащих физико-математическим моделям, выделяется кометная гипотеза акад. А.А.Маракушева. Однако и она содержит ряд эклектичных положений, требующих дальнейшего разрешения. Довлеющая при теоретических построениях эмпирика нередко тормозит экстраполяции, допустимые в рамках количественных моделей. Кометное вещество, несомненно, ближе, чем метеориты, к составу протопланетного. Однако вряд ли современная астрономия могла бы согласиться с представлениями о подобном агрегатном состоянии межзвездного пространства. Сложные молекулярные и даже минеральные образования комет так же, как и метеориты, по всей вероятности, являются продуктами планетной эволюции, хотя соотношение химических элементов в кометах, за некоторым исключением, по-видимому, можно использовать как важнейшую объективную характеристику при космогонических построениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вуд Дж. Метеориты и происхождение Солнечной системы. - М.: Мир, 1971. - 173 с.
2. Кейльман Г.А., Паняк С.Г. Проблемы планетарной корообразующей гранитизации //Геология метаморфических комплексов: Межуз. науч. темат. сб. Вып. 7, - Свердловск, 1979. - С.3-13.
3. Кленова М.В., Лавров В.М. Геология Атлантического океана. - М.: Наука, 1976. - 456 с.
4. Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. - М.: Наука, 1992. - 207 с.
5. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. - М.: Наука, 1986. - 320 с.
6. Паняк С.Г. Геолого-геохронологические аспекты ранней эволюции земной коры //ДАН СССР. - Т.273, №2, 1983. - С.419-422.
7. Хаббард У. Внутреннее строение планет. - М.: Мир, 1987. - 327 с.

УДК 563.713

О.В.Богоявленская

ОПЫТ ЭКОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ОРГАНОГЕННЫХ ПОСТРОЕК (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕГО-ВЕРХНЕГО ДЕВОНА ЗАПАДНОГО БОРТА МАГНИТОГОРСКОГО СИНКЛИНОРИЯ)

В районе Ириклинского водохранилища на реке Урал, по долинам рек Кумак и Суундук (Оренбургская область), давно известны выходы рифогенных известняков живетского-франского яруса (рис.1). Нами они изучались в районе пос.Новосеастополь и села Лужки. К живетскому ярусу в долине реки Суундук отнесена шубартауская толща, которая объединяет агломератовые туфы, содержащие обломки диабазовых порфиритов и органогенных известняков, а также органогенные известняки. В долине р.Кумак (разрез "Лужки") живетские отложения представлены суундукской толщей, которая близка по составу к шубартауской (туфы, туфоконгломераты, органогенные известняки) (рис.2). Как суундукская, так и шубартауская толщи перекрываются солончатской толщей, которая слагается переслаивающимися песчаниками, алевролитами с прослоями кремнистых и карбонатных пород (см.рис.2) и соответствует франскому ярусу. Полевые исследования проводились в тесном сотрудничестве с Г.А.Степановой ("Оренбурггеология") при участии Е.В.Короровой и В.А.Козлова (УГГГА).