



ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГЕОСФЕР: новые результаты и остающиеся проблемы*

*А. В. Витязев, Г. В. Печерникова
Институт динамики геосфер РАН, Москва*

Обсуждаются современное состояние проблемы происхождения Земли и процессы, приведшие к формированию ее оболочечного строения. Основное внимание уделено новым результатам, связанным со стабильными и короткоживущими радиоактивными изотопами, «цирконовым окном», позволяющими детализировать отдельные стадии формирования геосфер.

Введение

Среди крупнейших астрофизических открытий последних десятилетий два имеют непосредственное отношение к теории происхождения Земли и планет. Во-первых, открыты газопылевые диски около сотен молодых звезд, подобных раннему Солнцу. Во-вторых, открыты десятки планетных систем, правда, из-за известных особенностей их обнаружения, это в основном планеты-гиганты, большие или сравнимые по массе с Юпитером и Сатурном и располагающиеся весьма близко к своим звездам на достаточно эксцентричных орбитах. С одной стороны, теория происхождения планетной системы Солнца (см., например, [1—3]), созданная усилиями нескольких исследовательских групп в России, США и Японии в 70—90-х гг. ушедшего столетия, получила весомое подтверждение своих основ. Расчеты коллапса фрагментов межзвездных облаков показали, что в зависимости от удельного углового момента могут формироваться как одиночные звезды, так и двойные и (менее устойчивые) мульти-системы звезд, а также промежуточный класс звезд с газопылевыми дисками, содержащими небольшую долю массы начального фрагмента, недостаточную для формирования даже коричневых карликов. То, что в реестрах наблюдаемых дисков и планет встречаются более массивные аналоги Солнечной системы и еще не обнаружены планеты, подобные планетам земной группы, является естественным следствием инструментальной селективности наблюдений и пока не должно вызывать сомнений в правильности стандартного сценария происхождения Солнечной системы (ССПСС) [1—3]. Длительность отдельных

стадий эволюции раннего Солнца и газопылевого диска, продолжительность аккумуляции сначала малых, а затем и более крупных тел, включая заключительные стадии формирования планет, долгое время оставались предметом дебатов. К началу этого столетия данные по радиоактивным изотопам позволили нарисовать согласованную с динамическими расчетами картину.

Оценки общего возраста Солнечной системы (4.6 млрд лет) и длительности заключительных стадий формирования Земли (около 100 млн лет) вошли в соответствующие справочники и энциклопедии, лекционные курсы и популярные издания. Было показано [2—4], что, в отличие от воззрений 50—70-х гг., существенный нагрев недр части допланетных тел, дегазация, плавление и дифференциация примитивного вещества происходили уже на стадии их формирования, т. е. в первые миллионы и десятки миллионов лет. Следовательно, формирование геосфер необходимо отслеживать начиная уже со стадии формирования протопланет. В последние десятилетия не появлялись монографии или достаточно полные обзоры по теме, обозначенной в заглавии, и подводные итоги, имеющиеся к началу века. Настоящей работой мы намереваемся частично заполнить этот пробел.

Формирование ядра и мантии.

Образование Луны

Сценарии раннего образования ядер и мантий планет земной группы, предложенные в 80—90-х гг., основывались на факте существования ядра Марса и в то же время весьма древней его поверхности, указаниях на дифференцированность Меркурия также с древней поверхностью, древние (более 4.5 млрд лет) возрасты большинства железных метеоритов и ахондритов. Балансовые расчеты для Земли, основанные на U—Th—Pb изотопной системе [5], показали возможность согласования изотопных и геохимических маркеров в сценарии с дифференциацией,

протекающей одновременно с ростом планеты. Для Меркурия одновременно и независимо [6—8] был предложен сценарий срыва силикатной оболочки дифференцированной планеты, объясняющий целый ряд динамических и химических особенностей планет земной группы. Стало ясно, что даже крупные протопланеты не сразу аккумулировали все падающее на них вещество, часть его на время возвращалась на гелиоцентрические орбиты.

В конце 70-х гг. начался новый шторм проблемы образования системы Земля-Луна. Большинство западных исследователей считают наиболее перспективным сценарием формирования Луны однократное падение на растущую Землю дифференцированного тела массой порядка (не менее) массы Марса. Было проведено значительное количество расчетов динамических последствий такого столкновения. Большое число работ посвящено геохимическим следствиям, вытекающим из такого сценария, и сопоставлению их с данными по Луне. Достаточно полную картину имеющихся «за» и «против» для этого сценария можно найти в сборнике трудов специальной конференции по проблеме образования системы Земля-Луна [9]. В наших работах предложена комплексная модель формирования Луны ударными выбросами от нескольких крупных тел, позволяющая избежать трудностей гипотезы единичного удара [4, 10]. Существенно, что оба сценария, казалось, подтверждались независимыми данными по изотопной системе Hf-W, интерпретировавшимися как указание на длительность как роста Земли, так и формирования земного ядра в 100 млн лет и формирования Луны где-то в середине этого промежутка [9, 11].

Однако в 2002 г. одновременно тремя независимыми группами [12—14] были проведены прецизионные измерения отношений изотопов вольфрама в образцах метеоритного, лунного, земного и марсианского (SNC-метеориты

* Доклад, прочитанный в Институте геологии 2002 г.



— Shergotty-Nakhla-Shassigny) веществ и сделаны выводы, вступающие в противоречие с предшествовавшими динамическими расчетами. Следует напомнить особенности системы Hf-W. Гафний и вольфрам — рефракторные элементы (т. е. их отношение в отличие, например, от K/W не меняется в ходе аккумуляции), но вольфрам сидерофилен и поэтому в случае разделения расплавов силикатов и железа уходит с последним в ядерную компоненту. Период полураспада $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ достигает 9 млн лет. Обнаруженный небольшой избыток ^{182}W в образцах эвкритов, SNC-метеоритов, мантийных земных ксенолитов по отношению к содержанию в недифференцированных хондритовых метеоритах интерпретируется как весьма раннее (в первые 10 млн лет) отделение силикатов от железа.

В указанных выше работах [12—14] время роста и дифференциации Весты оценивается в 3—4 млн лет, время образования Марса и его ядра — менее 15 млн лет и рост Земли с одновременным формированием ее ядра — 30 млн лет. Для ударного события, вызвавшего образование Луны, приводится интервал 15—30 млн лет. Уменьшение в три раза интервала времени аккумуляции планет земной группы, предлагаемое изотопной космохимией, — серьезный вызов специалистам по расчетам аккумуляции тел в протопланетном диске, что и отметил A.G.W. Cameron в специальном обзоре в том же номере «Nature».

Нами был предложен выход из создавшейся ситуации, позволяющий согласовать космохимические данные и результаты теории и численных расчетов аккумуляции тел [15, 16]. Согласно теории происхождения планетной системы Солнца [1—3], образование планетезималей размерами в сотни километров уже в первые миллионы лет и их разогрев короткоживущим изотопом ^{26}Al (время полураспада 0.72 млн лет) до температуры плавления недр, позволяют интерпретировать показания Hf-W геохронометра как указание на плавление и дифференциацию в родительских планетезималах и отсутствие дальнейшей существенной регомогенизации этого материала в ходе последующей аккумуляции и формирования крупных протопланет в зоне планет земной группы. При этом мы имеем и естественное объяснение кажущегося противоречия между показаниями Hf-W геохронометра и данными по Nb—Zr [17],

согласно которым, для формирования земного ядра необходимо около 100 млн лет. Дело в том, что элементы этой (Nb—Zr) системы, проявляют диспропорционирование при достаточно больших (мегабарных) давлениях и таким образом свидетельствуют о длительности дифференциации уже в глубоких горизонтах фактически сформировавшейся Земли [17].

В заключение этого пункта отметим, что до сих пор остается нерешенной проблема легкой добавки к Fe-Ni в земном ядре (S?, O?, C?, Si?). Проведенные в ИДГ РАН эксперименты по нагреву и плавлению образцов метеорита «Царев» [18] показали, что в ходе инконгруэнтного плавления примитивного вещества Fe-Ni-S компонент легко отделяется от силикатов и может представлять собой вещество, формировавшее ядра планетезималей и первичное земное ядро. Содержание следовых сидерофильных элементов в Fe-Ni компоненте расплава вещества «Царева» и их среднее содержание в железных метеоритах весьма сходны. Для варианта примитивного материала с меньшей по сравнению с современной Землей массовой долей ядерного компонента, т. е. со значительным содержанием в примитивном веществе окислов железа, ряд исследователей предложили высокобарические механизмы ухода необходимой доли FeO в ядро [1, 4, 18]. Недавние

эксперименты и оценки [19] свидетельствуют о небольшом уменьшении содержания FeO в мантии в докембрии. В то же время вхождение кремния в состав ядра мало вероятно, так как в мантийных ксенолитах должно было быть тогда гораздо меньше сидерофильных ванадия и хрома. Таким образом, остается выбрать между FeS и FeO. Результаты расчетов термической истории планеты не противоречат изотопным данным, но, к сожалению, не позволяют пока выбрать предпочтительный вариант из возможных оставшихся. Разница в температурах плавления для разных вариантов смеси не отражается в конечном температурном распределении, так как избыточное тепло ведет к понижению вязкости, возрастанию эффективной теплопроводности и быстрому сбросу избыточной энтальпии. Наша сводка по энергобалансу ранней Земли приведена в табл. 1.

Происхождение первичной коры, гидросферы и атмосферы

Возраст древнейших земных пород около 4 млрд лет. Древнейшие лунные породы с высокогорий датируются 4.4—4.5 млрд лет, времена образования большинства хорошо датированных представителей основных классов метеоритов 4.5—4.6 млрд лет. Все упомянутые датировки подразумевают согласованность минимум по четырем не-

Таблица 1

Энергобаланс Земли в первые 500 млн лет

Источники	Эрг
Короткоживущие радиоактивные Al^{26} , Fe^{60}	10^{37}
Долгоживущие радиоактивные U, Th, K^{40}	$4 \cdot 10^{37}$
Энергия ударов падающих тел	$2 \cdot 10^{39}$
Энергия упругого сжатия	10^{37}
Энергия дифференциации	$1.5 \cdot 10^{38}$
Энергия приливной диссипации	10^{37}
Энтальпия падающих планетезималей	10^{37}
Энергия химических реакций *и фазовых переходов*	10^{37}
Солнечная энергия ИК – УФ + солн. ветер	$2.5 \cdot 10^{38}$

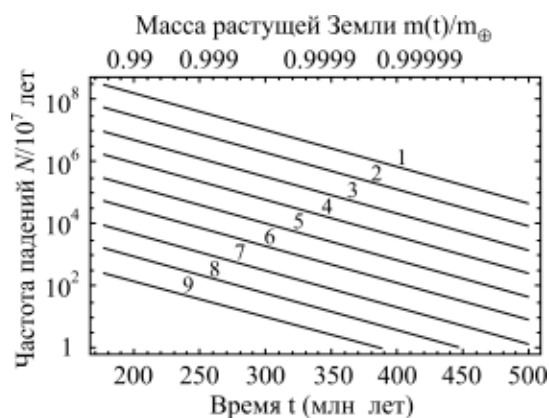
* В зависимости от эндо- или экзотермичности знак « - » или « + »

Процессы тепло-массопереноса	Nu
Ударное перемешивание	$10^2 - 10^5$
Адвективные течения	$10^2 - 10^5$
Конвективный теплоперенос	10
Кондуктивный теплоперенос, Диффузионный массоперенос	1
Флюидный	?
Приливное пенеплирование	10
Ударный выброс на гелио- и геоцентрические орбиты	1 – 10 % M_{\oplus}



Таблица 2
Распределение крупных тел в зоне питания растущей Земли

Масса растущей Земли, $m(t)$	$0.7 m_{\oplus}$	$0.9 m_{\oplus}$	$0.99 m_{\oplus}$
Время роста, 10^6 лет	~ 50	~ 80	~ 100
Массы и радиусы пяти крупнейших тел			
m_1 (g)	$3.1 \cdot 10^{26}$	$1.1 \cdot 10^{26}$	$1.2 \cdot 10^{25}$
r_1 (km)	2600	1900	900
m_2 (g)	$9.0 \cdot 10^{25}$	$3.1 \cdot 10^{25}$	$3.2 \cdot 10^{24}$
r_2 (km)	1700	1200	570
m_3 (g)	$5.1 \cdot 10^{25}$	$1.8 \cdot 10^{25}$	$1.8 \cdot 10^{24}$
r_3 (km)	1400	1000	470
m_4 (g)	$3.5 \cdot 10^{25}$	$1.2 \cdot 10^{25}$	$1.2 \cdot 10^{24}$
r_4 (km)	1300	900	420
m_5 (g)	$2.6 \cdot 10^{25}$	$9.0 \cdot 10^{24}$	$9.0 \cdot 10^{23}$
r_5 (km)	1200	800	380
Интервал радиусов (км)	Число тел $N(r)$ в зоне питания планеты		
500—100	2150	870	127
100—10	$6.9 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^4$
10—1	$2.2 \cdot 10^8$	$8.8 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$



Уменьшение со временем частоты столкновений растущей Земли с планетезиμαлями в интервале диаметров: 1 — 0.5÷1 км, 2 — 1÷2 км, 3 — 2÷4 км, 4 — 4÷8 км, 5 — 8÷16 км, 6 — 16÷32 км, 7 — 32÷64 км, 8 — 64÷128 км, 9 — 128÷256 км

зависимым методикам.

Древние цирконы Австралии указывают на седиментогенез в присутствии водных бассейнов и гранитообразование уже 4.1—4.4 млрд лет назад [20, 21]. Строго говоря, «образцов» первичной коры, гидросферы и атмосферы среди нановключений в цирконах пока не обнаружено. Однако данные о химическом и изотопном составе уже десятков тысяч зерен $ZrSiO_4$ (средний вес отдельного зерна около 2 мг) открывают уникальное «цирконовое окно» для исследователей первых сотен миллионов лет эволюции примитивных оболочек и отсеивают ранние гипотезы, базировавшиеся лишь на том или ином варианте формирования планеты. В частности, ясно,

что подходы, основанные на варианте «недифференцированной первичной Земли», представляют теперь лишь исторический интерес. В наших расчетах по стандартному сценарию формирования Земли получены спектры масс и скоростей тел, формировавших планету, и оценен темп роста планеты [1—4, 10]. Достаточно наглядное представление о массах тел в зоне растущей планеты и падавших на нее тел дают табл. 2 и рисунок.

Осредненный состав тел в зоне планет земной группы, включая пояс астероидов, согласно современной парадигме близок к составу хондритов. В то же время давно показано, что ни из одного отдельного класса углистых (CI, CM, CV, CO), обыкновенных (H, L, LL), энстатитовых (EH, EL) и других хондритов и ахондритов Землю построить нельзя. Можно подобрать смесь из известных классов метеоритов, представленных в земных коллекциях, удовлетворяющую одновременно изотопным, геохимическим и геофизическим критериям [1—3], но нет гарантии, что существенная доля вещества была привнесена планетезиμαлями в среднем хондритового, но в остальном (содержание железа, степень окисленности и т. д.) весьма варибельного состава, которые либо полностью выпали на планеты, либо еще не обнаружены, например, в поясе астероидов.

Неуверенность в составе легкой примеси ядра и составе мантии в несколько процентов не является кардинальной трудностью для попыток смоделировать дифференциацию первичной Земли на ядро и мантию. Однако для описания возможных составов примитивной коры, гидросферы и атмосферы указанные неопределенности в валовом составе тел, образовавших Землю, ведут к неопределенности обилия летучих (H_2O , CO_2 и др.) в несколько раз.

Объединенные данные по изотопии кислорода ($^{16}O/^{17}O/^{18}O$), D/H, Ag/ H_2O и другим отношениям показывают, что кометное вещество и углистые хондриты могли привнести не более нескольких процентов массы Земли [1—4, 10].

В пересчете на H_2O это может составить все же от нескольких единиц до десяти масс современной гидросферы ($2 \cdot 10^{24}$ г). Обыкновенные хондриты содержат существенно меньше летучих (~0.1 % H_2O), но и этого с небольшим избытком хватает для формирования гидросферы. В то же время расчеты по ударному кратерообразованию в процессе роста планеты указывают на то, что заметная доля (до нескольких процентов) вещества планетезиμαлей и поверхности растущей планеты могла выбрасываться на гео- и даже гелиоцентрические орбиты [1—3, 10]. Летучие могли теряться в больших пропорциях, и потеря воды в несколько масс современного океана ($1.4 \cdot 10^{24}$ г) не считается невозможной. Наконец следует еще знать, сколько летучих может содержаться в мантии.

Имеющиеся оценки геохимиков и геофизиков сильно разнятся, консервативные оценки дают около $(1—3) \cdot 10^{24}$ г SNC метеориты, вероятно, марсианского происхождения, содержат от 0.04 до 0.4 % воды по весу. Для земной мантии соответствующая масса воды составила бы от одной до нескольких масс современного океана. Не обсуждая здесь ситуацию по другим летучим, заметим лишь, что давно известна нижняя оценка массового содержания углерода в Земле. Если весь углерод земных карбонатов перевести в атмосферу, то ее масса и состав будут близки к венерианской (~ $4.5 \cdot 10^{23}$ г). В сложившейся ситуации, по-видимому, необходимо прежде всего рассмотреть два крайних класса моделей с минимальным и максимальным содержаниями летучих. Для максимального варианта можно принять максимально возможный привнос (по массе) углистыми метеоритами и кометным веществом в 10 % от массы Земли. Этот вариант по существу рассматривался в работах Рингвуда, встретил резкие возражения (см., например, [1]) и фактически сегодня не развивается. Для «сухого» варианта Земли с минимальным обилием летучих можно задаться модельным составом, содержащим более 90 % вещества обыкновенных хондритов и менее 5 % вещества углистых хондритов, принимая минимальные содержания летучих с необходимой потерей в ударной дегазации. В рамках такого подхода для воссоздания первичных атмосферы и гидросферы можно использовать результаты экспериментов по ступенчатому отжигу образцов ме-



теоритов. Исследование образцов, доведенных до плавления, может дать указание на дифференциацию, что и было сделано нами в вышеупомянутых экспериментах с метеоритом «Царев». Исследования показали, что кроме первичной дифференциации на силикатный и металлический компоненты и та и другая подвергаются вторичным процессам ликвации. В лабораторных условиях (при небольших давлениях) в расплаве металла FeS отделяется от FeNi, а в силикатном компоненте проявляется отделение очень небольшой части компонента анортозитового состава (аналога первичной коры?) от прочего, в среднем, ультраосновного компонента (примитивной мантии?). Этот результат подтверждает ранние эксперименты по плавлению образцов углистого хондрита Allende и силикатной части обыкновенного хондрита Jilin, но требует дальнейшего осмысления. Нами было предложено организовать поиск на древних (старше 4 млрд лет) лунных высокогорьях следов ударных выбросов материала с поверхности архейской Земли [22]. Находки такого материала могли бы существенно увеличить наши знания о поверхностных оболочках древней Земли. Недавно известный американский астронавт Армстронг предложил соответствующий исследовательский проект.

Образование ионосферы и магнитосферы

Данные по намагниченности древних пород весьма ограничены. Отметим классический результат [23], указывающий на существование геодинамо 3.5 млрд лет назад. В австралийских цирконах возрастом 4.1—4.2 млрд лет были обнаружены следы остаточной намагниченности [21]. Нами ранее [1] были проведены оценки времени образования ионосфер и магнитосфер планет земной группы по инертным газам. Основная идея состояла в том, что при формировании ионосфер и магнитосфер возникает экранирующая область, не позволяющая частицам солнечного ветра эффективно проникать в атмосферу и накапливаться в ней. Из сравнения содержаний аргона и неона в атмосферах Земли и Марса и данных по их обилию в потоке солнечного ветра следует вывод о том, что привнесение Ar и Ne в атмосферу Марса и Ne в атмосферу Земли могло быть весьма велико. Так как поглощение этих инерт-

ных газов породами Земли и Марса и термическая диссипация аргона из экзосфер этих планет за миллиарды лет пренебрежимо малы, отсутствие большого количества ^{36}Ar в атмосфере Марса можно объяснить лишь ранним возникновением ионосферы (и атмосферы) или магнитосферы (т. е. ядра, генерирующего магнитное поле и вызывающего в случае достаточно мощной атмосферы возникновение магнитосферы). Возникновение раннего экрана предотвратило эффективное проникновение частиц солнечного ветра в марсианскую атмосферу. Для Марса по аргону следует оценка сверху: время возникновения защитного экрана менее 400—700 млн лет. По неону в марсианской атмосфере простую оценку сделать нельзя, так как Ne весьма эффективно диссипирует из его экзосферы (почти так же, как гелий из земной). Для более массивной Земли диссипацией неона можно пренебречь и получить аналогичную оценку времени возникновения защитного экрана у Земли «по неону», что дает менее 1.6 млрд лет. В этих оценках параметры солнечного ветра (содержание протонов на данном расстоянии от Солнца и скорость солнечного ветра) были взяты равными принимаемым сегодня средним значениям. Имеющиеся данные по интенсивности солнечного ветра в зернах древних лунных пород, говорят о слабом повышении интенсивности солнечного ветра в прошлом для пород с наибольшими возрастными. У очень молодого активного Солнца интенсивность ветра в первые миллионы лет могла быть и на порядок больше (как это наблюдается у молодых звезд). Отметим, что двукратное и большее увеличение скорости или числа протонов уменьшает приведенные цифры не менее чем в два раза. Более определенные выводы с использованием указанной методики можно будет получить после прецизионных измерений обилия изотопов редких газов в марсианской атмосфере и солнечном ветре.

Условия для существования предбиоты в первые 500 миллионов лет

Используются два взаимодополняющих подхода для определения условий возможности существования жизни на ранней Земле. Первый заключается в описании вероятных физико-химических

условий исходя из того или иного сценария происхождения Земли и ее геосфер и затем моделировании возникновения биоты. Второй исходит из возможности раннего существования “миров АТФ, РНК, липидов” и т. д., чтобы ко времени 3.5 млрд лет назад уже было возможно появление одноклеточных, чьи следы (окаменелые остатки колоний примитивных микроорганизмов) обнаружены в древних породах этого возраста. Гипотеза Дж. Дарвина о зарождении жизни в теплых первичных бассейнах, гипотеза Опарина о коацерватах, эксперименты Миллера-Юри стали основой для концепции весьма восстановительных условий на ранней Земле. По мнению Галимова [24], наиболее благоприятная обстановка для АТФ-мира была бы в случае восстановительной атмосферы при умеренно окисленной коре и присутствии водных бассейнов. Обнаружение современных термофилов привело к гипотезам о зарождении жизни вблизи горячих термальных источников. В одной из последних работ [25] детально обсуждается теория перехода от абиотической геохимии к хемосинтезу прокариотам и далее к примитивным клеткам с ядрами в условиях гидротермальных источников в первичных бассейнах. Изотопные указания на признаки жизни уже 3.8 млрд лет пока признаются дискуссионными. Живо обсуждаются и разнообразные варианты идеи панспермии: от возможности привноса метеоритным или кометным веществом простейших аминокислот (слабый вариант панспермии) до поставки спор внесолнечного происхождения (сильный вариант панспермии). Указывалось на возможность обмена кометным материалом с соседними планетными системами, особенно на ранних стадиях существования Солнечной системы, когда Солнце еще было в составе нераспавшегося звездного скопления [26]. В веществе метеорита «Murchison» обнаружены следы 90 аминокислот, 8 из которых составляют основу земной биоты. Важно, что у аминокислот этого метеорита имеется заметный избыток L-форм над D-формами, что позволяет поновому подойти к проблеме киральности. По-видимому, в ближайшие годы следует ожидать существенного прорыва в понимании происхождения жизни.

Ниже мы сформулируем некоторые выводы, которые можно сделать на основании уже проведенных к этому времени исследований по стандартному сце-



нарию образования Солнечной системы и формирования земных геосфер с учетом последних данных по изотопным системам и австралийским цирконам.

Выводы

- Согласованные теория и данные сравнительной планетологии и наук о Земле позволяют с уверенностью говорить о том, что формирование планет земной группы проходило от появления первых конденсатов (4.566—4.567 млрд лет назад) за 30—100 млн лет.

- Формирование Луны было вызвано в основном ударными выбросами от крупных падающих тел незадолго до завершающей стадии формирования Земли.

- Отделение высокожелезистого компонента от силикатов протекало в некоторых родительских телах современных метеоритов и в растущих протопланетах.

- Образование земного ядра в основном происходило в ходе аккумуляции Земли.

- Дифференциация мантийного вещества, начавшаяся в процессе аккумуляции Земли, продолжалась в последующие периоды, что согласуется с результатами по исследованию других изотопных систем (Nd-Sm, Rb-Sr).

- Существенное снижение потока падавших тел и интенсивности ударной переработки могло быть лишь к концу первых 500 млн лет (см. табл. 2 и рисунок). К этому моменту затухание ударной стерилизации могло дать шанс к выживанию первичной биоты.

- Если падавшие тела были так же разнообразны по составу, как это мы наблюдаем в метеоритах и межпланетной пыли в земной коллекции, то могли быть весьма большие временные и пространственные флуктуации восстановительно-окислительной обстановки в отдельных резервуарах и соответствующие вариации в составе так называемого C-O-N-P-S – мира органики.

- Важной вехой в энергетическом балансе Земли был период, когда поток солнечной энергии на Землю сравнялся и стал больше потока кинетической энергии падавших тел. Стохастический характер аккумуляции планеты привел к большим флуктуациям термодинамических условий и переменяемости во времени и пространстве горячих и холодных резервуаров.

Ограниченное количество данных о ранней Земле не позволяет пока сделать

более определенные выводы о составе ранней атмосферы и ее массе. То же следует сказать и о массах первичной гидросферы и коры. Определенные надежды мы связываем с лабораторными экспериментами типа планируемого в ИДГ РАН эксперимента «Царев-2».

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, ИДГ РАН и программы «Проблемы зарождения биосферы Земли и ее эволюции».

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С. *Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция*. М.: Наука, 1990. 296 с. 2. Vityazev A. V., Pechernikova G. V. *Late stages of accumulation and early evolution of the planets // Planetary sciences, American and Soviet Research — Proceedings from the US-USSR Workshop on Planetary Sciences / Eds. T. M. Donahue, K. K. Trivers, D. M. Abramson — Washington, D. C.: National Academy Press, 1991. P. 143—162.* 3. Vityazev A., Pechernikova G. *Macroimpacts and crust and atmosphere forming in early terrestrial history // Planetary Systems: the long view / Eds. L. M. Celnikier and J. Tran Thanh Van. France: Editions Frontieres, 1998. P. 95—97.* 4. Витязев А. В., Печерникова Г. В. *Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли, 1996. № 6. С. 3—16.* 5. Azbel I. Ya., Tolstikhin I. N., Kramers J. D., Pechernikova G. V., Vityazev A. V. *Core formation during homogeneous Earth accretion: a dynamic approach // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993. V. 57. № 12. P. 2889—2898.* 6. Pechernikova G. V., Vityazev A. V. *Erosion of Mercury silicate shell during its accumulation // XVIII LPSC. Houston: The Lunar and Planetary Institute, 1987. P. 770—771.* 7. Vityazev A. V., Pechernikova G. V., Safronov V. S. *Formation of Mercury and removal of its silicate shell // Mercury / Eds. F. Vilas, C. R. Chapman, M. S. Matthews. Tucson: The University of Arizona Press, 1988. P. 667—669.* 8. Cameron A.G.W., B. Fegley, Jr., W. Benz and W. L. Slattery. *The strange density of Mercury: theoretical considerations // Mercury / Eds. F. Vilas, C.R. Chapman, M.S. Matthews. Tucson: The University of Arizona Press, 1988. P. 692—708.* 9. *Origin of the Earth and Moon / Eds. R. Canup and K. Righter. Univ. Arizona Press, Space Science Series, 2000. 555 p.* 10. Pechernikova G. V., Vityazev A. V. *Statistical model of Earth-Moon coaccretion and macroimpacts // XXVII LPSC. Houston: LPI, 1996. P. 1213—1214.* 11. Lee D. C., Halliday A. N. *Hafnium-tungsten chro-*

nometry and the timing of terrestrial core formation // Nature, 1995. V. 378. P. 771—774. 12. Yin Q. Z. et al. *A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites // Nature. 2002. V. 418. P. 949—952.* 13. Kleine T. et al. *Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry // Nature, 2002. V. 418. P. 952—955.* 14. Shoenberg R. et al. *New W-isotope evidence for rapid terrestrial accretion and very early coreformation // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002. V. 66, № 17. P. 3151—3160.* 15. Vityazev A.V., Pechernikova G.V., Bashkurov A.G. *Early accretion and differentiation of protoplanetary bodies and Hf-W chronometry // Large Meteorite Impacts III, 2003. #4035, Sess. 1.* 16. Vityazev A.V., Pechernikova G.V., Bashkurov A.G. *Accretion and differentiation of terrestrial protoplanetary bodies and Hf-W chronometry // LPSC 2003. #1656, Sess. 85.* 17. Jacobsen S.B., Yin Q. Z. *Core formation models and extinct nuclides. LPSC XXXII, 2001. 1961 pdf.* 18. Zetzer J.I., Vityazev A.V. *Experiment «Tsarev» and differentiation of chondritic bodies // Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System/ Eds. H. Rickman and M.J. Valtonen. Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 474—480; Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72, № 1—3. P. 475—480.* 19. Komiya T. *Secular Change of the Solid Earth. 2003. In “Goldschmidt Conference Abstracts 2003”, A231.* 20. Wilde S. A. et al. *Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature, 2001. V. 409, P. 175-178.* 21. Harrison T. M., Mojzsis S. J. *The mission to really early Earth: A progress report. 2003. In “Goldschmidt Conference Abstracts 2002”, A135.* 22. Pechernikova G. V., Vityazev A. V. *Exchange of Material During Formation of the Earth and Moon // Abst. Internat. Conf. “Origin of the Earth and Moon”. Monterey, 1998. P. 31.* 23. McElhinny M. W., Senanayake W. E. *Paleomagnetic evidence for the existence of the geomagnetic field 3.5 Ga ago // J. Geophys. Res., 980. V. 85. P. 3523—3528.* 24. Э. М. Галимов. *Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М: Едиториал УРСС, 2001. 256 с.* 25. Martin W. and Russel M. J. *On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. Phil. Trans. R. Soc. London. B, 2003. 358. P. 59—85.* 26. Vityazev A.V. *Formation of cometary subnuclei // Planet. Space Sci., 1996. V. 44. № 9. P. 967—971.*