

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.04.276>

УДК 52-54; 577.3

М. В. РАГУЛЬСКАЯ, В. Н. ОБРИДКО

PACS number: 92.70.Qr

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Калужское шоссе, 4, г. Троицк, г. Москва, 108840, Россия
E-mail: 9229val@gmail.com; obridko@mail.ru

СОЛНЦЕ И БИОСФЕРА: ПАРАДОКСЫ 4 МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ ВЗАИМНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

Предмет и цель работы: В статье обсуждается влияние раннего Солнца и параметров формирующейся солнечной системы на возникновение геомагнитного поля и первичной биосферы Земли.

Методы и методология: Проведена верификация имеющихся теоретических моделей раннего Солнца и геомагнитного поля экспериментальными палеомагнитными, геологическими и биологическими данными.

Результаты: Первый миллиард лет совместного существования Солнца и биосферы – это время парадоксов. Один из основных – так называемый “парадокс слабого молодого Солнца”. Согласно астрофизическим моделям, светимость раннего Солнца была на 30 % меньше, чем сегодня. Это формировало недостаток поступления энергии на Землю, при котором первые 2.3 млрд лет температура поверхности Земли должна была быть ниже точки замерзания океанской воды, т. е. Земля представляла собой замерзший шар. Однако, согласно палеонтологическим данным по ископаемым древним организмам, а также геологическим данным, доступная для изучения древняя биосфера и древние геопороды формировались при средней температуре поверхности Земли более 60°, причем при наличии большого количества жидкой поверхностной воды. Еще одним парадоксом является существенное расхождение времени появления магнитного поля Земли согласно теоретическим моделям и экспериментальным данным. Теоретические модели геодинамо дают оценку появления твердого ядра в 1 ÷ 1.5 млрд лет назад, в то время как по палеомагнитным данным определяется геомагнитное поле (сопоставимое по величине с нынешним) в цирконах возраста до 4.2 млрд лет.

Заключение: Систематизированы возможные пути разрешения парадокса “слабого молодого Солнца”, геомагнитного парадокса и изотопного ксенонового парадокса. Большинство из них включает в себя рассмотрение земных процессов в зависимости от общей ситуации в ранней Солнечной системе и учета роли биосферы в формировании физических условий поверхности Земли. Ранняя Земля рассматривается как открытая динамическая система в совокупности солнечно-земных связей и динамики раннего Солнца, динамики движения и формирования планет ранней Солнечной системы (например, миграции раннего Юпитера), а также в рамках изучения системы Земля–Луна.

Ключевые слова: раннее Солнце и Солнечная система, влияние солнечного излучения на биосферу, физические условия на ранней Земле, парадокс “слабого молодого Солнца”, геомагнитный парадокс

1. Введение

Первый миллиард лет совместного существования Солнца и биосферы – это время парадоксов. Самые известные из них – парадокс “слабого молодого Солнца”, геомагнитный парадокс и ряд изотопных парадоксов. Парадоксы возникают из-за противоречия картины, которая складывается из совместного рассмотрения теоретических моделей физических условий на ранней Земле и немногочисленных экспериментальных данных о первом миллиарде лет существования нашей планеты. Вопрос о возможности верификации имеющихся теоретических моделей формирования Солнечной системы и физических условий на ранней Земле с точки зрения существования и развития современного типа жизни подробно

рассматривается в [1]. Книга создана авторским коллективом по материалам совместного коллоквиума “Раннее Солнце, физические условия на ранней Земле и происхождение жизни” (ноябрь 2016 г., Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга) в рамках сотрудничества Астрономического общества России и программы Президиума РАН “Эволюция органического мира и планетарных процессов”.

Проблема взаимосуществования Солнца и биосферы обоюдоострая: физические условия начала земных времен накладывали ограничения на возможные варианты жизни (“бытие определяет сознание”), а имеющиеся на сегодня астробиологические и палеонтологические данные об экосистемах ранней Земли позволяют отбрасывать те физические модели раннего Солнца, которые не соответствуют факту и условиям экспериментально подтвержденного существования

© М. В. Рагульская, В. Н. Обридко, 2017

биосистем. Например, в реальности вопрос о возрасте магнитного поля Земли и температуре ранней Земли, скорее всего, будет решен исходя из оптимальных условий существования первых белковых структур, а не из предпочтений магнитогидродинамики. И, наоборот, из нескольких моделей возможных мест и механизмов первичного зарождения жизни предпочтительнее те, которые объясняют, каким образом первые организмы противостояли суперактивному разрушающему воздействию излучения древнего Солнца.

Для существования любого процесса нужна энергия. У биосферы есть только два глобальных источника энергии – энергия Солнца и земных недр. Солнце – основной источник энергии для всех планет солнечной системы, его динамика модулирует все пространственно-временные закономерности межпланетной среды в гелиосфере. Динамика молодого Солнца и физические условия на ранней Земле, безусловно, определяли формирование земной биосферы.

2. Раннее Солнце

Возраст Солнца определяется по возрасту старейшего метеоритного вещества примерно в 4.56 млрд лет. Земля немного моложе Солнца, ей около 4.5 млрд лет. Первыми из планет образовались газовые планеты-гиганты, собрав в себя основную массу из газопылевого облака будущей Солнечной системы. Миграция Юпитера и Сатурна по Солнечной системе остановила рост Земли и позволила ей существовать в привычном для нас диапазоне современных физических характеристик (масса, место расположения в ряду других планет, наличие магнитного поля и атмосферы). На данный момент подтверждена оценка общей длительности завершающего этапа роста Земли – около 100 млн лет от начала образования из протопланетного диска.

Молодое Солнце сильно отличалось от современного. Общая картина современных представлений о строении и эволюции звезд солнечного типа, самого Солнца и первых 0.5 ÷ 1 млрд лет его существования строится на основе наблюдений за солнцеподобными звездами (программа “Солнце во времени”). Молодое Солнце (1 млрд лет), вероятно, имело период вращения вокруг своей оси около 10 дней. В ту эпоху активность

Солнца была более высокой, чем сейчас, но менее регулярной. Затем установились циклы, но их амплитуды менялись: последовательности высоких циклов сменялись эпохами низкой активности. Электромагнитное излучение Солнца на этих этапах эволюции в оптическом диапазоне менялось незначительно, однако в мягком рентгеновском диапазоне (0.15 ÷ 4 кэВ, короче 90 Å) отношение рентгеновской светимости молодого Солнца к его полной (боллометрической) светимости было в 1000 раз больше, чем в обычный максимум солнечной активности в современную эпоху. То же относится к интенсивности солнечных космических лучей.

3. Парадокс слабого молодого Солнца

Один из основных парадоксов существования ранней биосферы – так называемый “парадокс слабого молодого Солнца”. Согласно астрофизическим моделям, светимость раннего Солнца была на 30 % меньше, чем сегодня. Этот вывод базируется на предположении, что на стадии главной последовательности светимость Солнца обеспечивается ядерными реакциями. Низкая светимость формировала недостаток поступления энергии на Землю, при котором первые 2.3 млрд лет температура поверхности Земли должна была бы быть ниже точки замерзания океанской воды, т. е. Земля представляла собой замерзший шар. Однако, согласно палеонтологическим данным об ископаемых древних биоструктурах и данным генетического моделирования первых биосистем, для существования этих видов живых организмов средняя температура поверхности Земли наоборот должна была быть намного горячее, чем сегодня, – более 60 °С. Геологические данные также указывают на то, что древние породы формировались в присутствии большого количества жидкой поверхностной воды в течение всех последних 4 млрд лет. На верхней панели рис. 1 приведена кривая боллометрической светимости Солнца, а на нижней панели – динамика изменения температуры поверхности Земли (нижняя кривая), количества кислорода (средняя кривая) и воды (верхняя кривая) за последние 4 млрд лет ([1], глава 20).

Рассмотрим этот вопрос немного подробнее.

Светимость Солнца – полная мощность, излучаемая нашей звездой. Спутниковые боллометри-

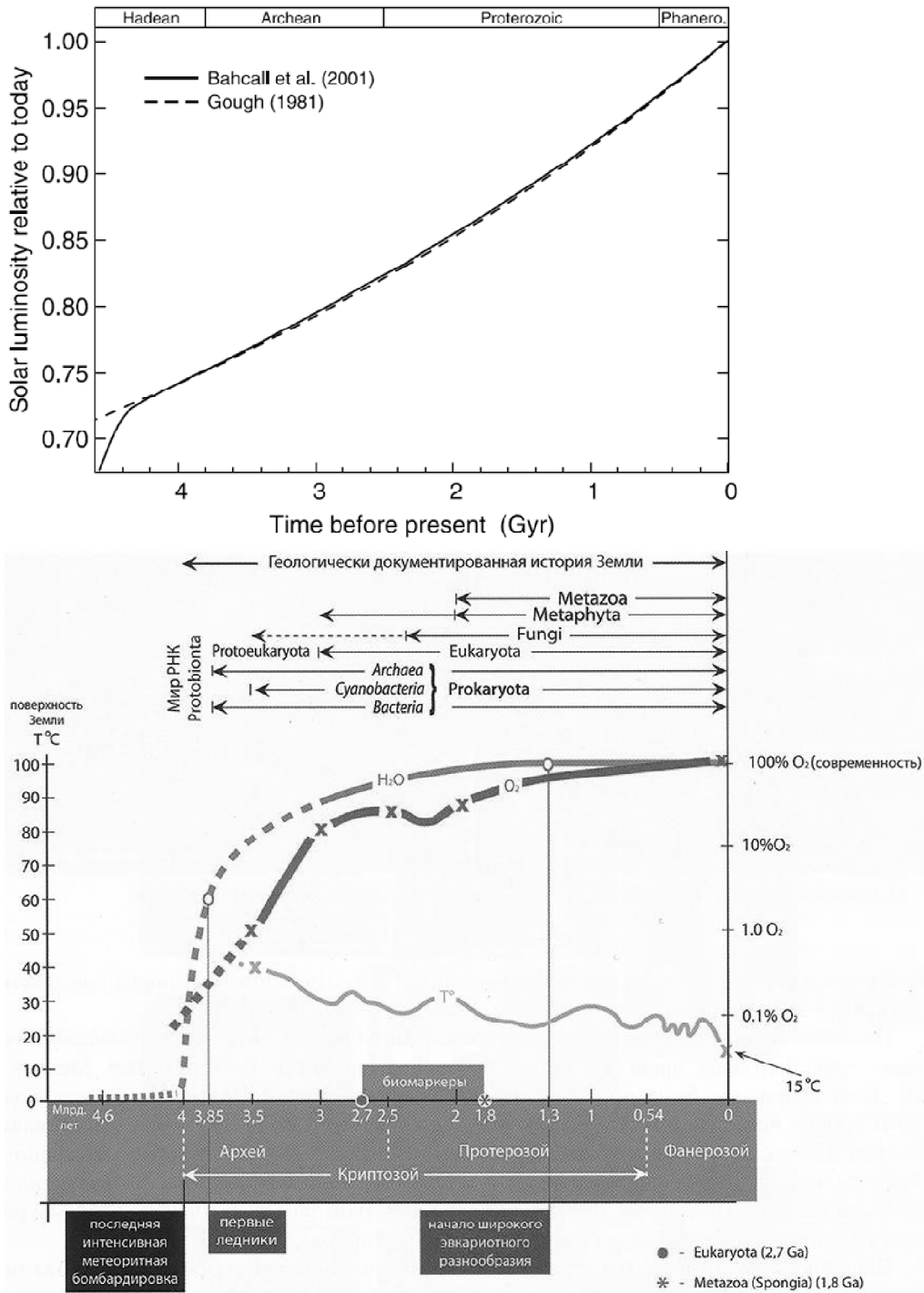


Рис. 1. Парадокс слабого молодого Солнца. Верхняя панель – болометрическая светимость Солнца за время его эволюции в течение последних 4.6 млрд лет по стандартной модели (сплошная линия) и в аппроксимации (штриховая линия). По горизонтальной оси – миллиарды лет, по вертикальной – эволюция солнечной светимости относительно современной (современная светимость принята за единицу). Нижняя панель – динамика количества кислорода, воды и температуры поверхности Земли за последние 4 млрд лет и время появления основных биосферных видов (верхняя часть панели). Из работы А. Ю. Розанова ([1], глава 20)

ческие измерения позволили определить ее с хорошей точностью, в настоящий момент она равна $(3.844 \pm 0.001) \cdot 10^{33}$ эрг/с. Изменения в

химическом составе Солнца в процессе ядерных реакций приводят к тому, что наша звезда медленно меняет светимость, радиус и период вра-

щения со временем. За время ее эволюции светимость увеличилась почти в 1.5 раза, период вращения увеличился с $8 \div 10$ дней в первый миллиард лет до $27 \div 29$ в настоящее время, а потеря массы составила около 3 % (при использовании стандартной солнечной модели).

Стандартная солнечная модель – результат расчета эволюции звезды массой в 1 Солнце при условии, что при возрасте 4.6 млрд лет светимость и радиус звезды равны современным солнечным значениям. Калибровка осуществляется путем подгонки двух величин: содержания гелия (которое из наблюдений не определяется) и параметра теории конвекции. Используются также некоторые упрощения: полная сферическая симметрия задачи, отсутствие аккреции и потери массы, без перемешивания вне областей конвекции и др. Согласно стандартной модели, светимость раннего Солнца составляла 70 % от современного значения. При этом точка замерзания океанской воды 275 К соответствует 0.843 современной светимости. То есть при сохранении современных значений альбедо и излучательной способности половину своей жизни Земля должна была провести без жидкой воды на поверхности. Из совокупности экспериментальных геологических, палеонтологических и биологических данных известно, что это не так.

Какие же есть пути решения парадокса? Их три. Можно предположить, что в эпоху начала земных времен было

- 1) другое Солнце,
- 2) другая Земля,
- 3) другое взаиморасположение Земли и Солнца.

В рамках первой версии можно рассмотреть изменение спектрального состава солнечного излучения. Однако эффективная температура за 4.6 млрд лет выросла незначительно, от 5650 до 5770 К. На рис. 2 показан спектральный состав излучения Солнца за границей атмосферы (точки). Спектр современного Солнца в видимой области близок к спектру абсолютно черного тела с температурой 5770 К. Сдвиг спектра в красную область, вызванный понижением эффективной температуры до 5650 К (как у молодого Солнца), незначителен. Поток энергии от молодого Солнца аппроксимирован кривой для абсолютно черного тела с температурой 5650 К. Из рис. 2 видно, что увеличение потока излучения в красной области спектра, вызванное сдвигом температу-

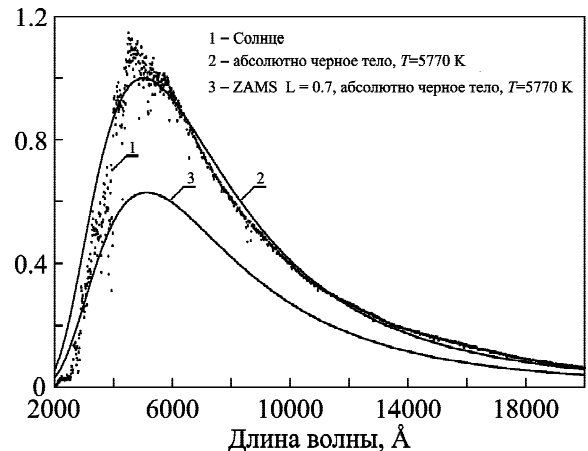


Рис. 2. Спектральный состав излучения Солнца (точки) и абсолютно черного тела при эффективных температурах, соответствующих современному Солнцу и ZAMS (Zero Age Main Sequence – главная последовательность нулевого возраста). По вертикальной оси – поток излучения на земной орбите, нормированный так, что максимум потока для абсолютно черного тела равен 1. Из работы В. А. Батурина и др. ([1], глава 2)

ры Солнца, гораздо меньше общего ослабления потока, вызванного уменьшением светимости ([1], глава 2).

В рамках современных представлений об эволюции звезд неизбежен рост светимости в процессе эволюции вследствие вызванного термоядерными реакциями изменения химического состава плазмы в ядре. Превращение водорода в гелий вызывает увеличение молекулярного веса вещества в ядре звезды. Осаждение гелия и тяжелых элементов усиливает этот процесс. Увеличение молекулярного веса приводит к уменьшению давления, но давление должно компенсировать вес вышележащих слоев. Для поддержания давления на нужном уровне центральные области звезды сжимаются и разогреваются. Увеличение концентрации массы к центру приводит к тому, что для сохранения гидростатического равновесия необходимо еще большее давление в центре, что дополнительно усиливает эффект разогрева и уплотнения ядра звезды. Это приводит к тому, что энерговыделение увеличивается, и с ним увеличивается светимость. Если внести существенные искусственные изменения в физику плазмы раннего Солнца путем вариации параметров сечения рассеяния, химического состава или предположения полного перемешивания, то даже такие модели не ре-

шают проблему “тусклого молодого Солнца”. Самые оптимистичные из них дают 80 % светимости от современного состояния (напомним, температура замерзания океанов соответствует 0.843 современной светимости Солнца). То есть нестандартные модели раннего Солнца, представленные на рис. 3 ([1], глава 4), также не дают необходимую компенсацию солнечной светимости.

Интересной гипотезой представляется допущение значительной потери массы Солнцем в процессе эволюции. Более массивное Солнце было бы более ярким, и Земля была бы ближе к нему. Истечения 7 % массы за время эволюции было бы достаточно, но пока нет никаких данных, которые бы подтверждали столь значительную потерю массы Солнцем. В работах М. А. Лифшица и М. М. Кацовой указывается, что данные наблюдений за солнцеподобными звездами позволяют предположить не более 3 % потери массы нашей звездой за все время ее существования ([1], глава 5).

Другой возможностью “приблизить” молодую Землю к Солнцу является захват Протоземли массивной системой Юпитер–Сатурн во время миграции раннего Юпитера внутрь Солнечной системы. “Приближение” к Солнцу могло составить в этом случае более 15 % от современного расстояния от Земли до Солнца. Однако, по оценкам, процесс миграции продолжался не более 100 млн лет первичной эволюции Солнечной

системы, что не компенсирует недостаток энергии для поверхности Земли в последующее время эволюции биосферы.

Наиболее часто обсуждаемым и перспективным путем выхода из “парадокса раннего Солнца” являются предположения о других условиях на самой ранней Земле.

Предполагается, что ранняя Земля имела другие альbedo и теплоизлучение. Факторами, влияющими на этот процесс, могли быть

- другой состав атмосферы с увеличенным содержанием парниковых газов;
- геотермальная суперактивность, обеспечивающая интенсивный подогрев поверхности литосферой;
- активные биогенные факторы, участвующие в изменении альbedo в планетарном масштабе;
- другая гравитационная постоянная.

Первый вариант активно обсуждается в литературе, четвертый является слишком экзотическим. Е. Г. Храмовой была предложена интересная идея о существовании планетарных биогенных пленок на поверхности древних океанов ([1], глава 6). Наличие масштабных пленок из добиологического или биологического органического вещества на поверхности океанов могло обеспечивать следующие эффекты:

- 1) уменьшение влажности – уменьшение альbedo за счет уменьшения облачности;
- 2) уменьшение влажности – увеличение потока инфракрасного солнечного излучения, достигшего поверхности Земли;
- 3) возможное увеличение температуры океана за счет уменьшения парообразования;
- 4) изменение соотношения концентраций углекислого газа в океане и в атмосфере;
- 5) постоянно пополняемый источник парниковых газов;
- 6) зависимость парникового эффекта от солнечной активности;
- 7) механизм саморегуляции (химический, а позже и биологический).

Гипотеза о более активном геотермальном подогреве поверхности ранней Земли за счет литосферных процессов также представляется весьма перспективной. В моноварианте она не дает нужной компенсации недостатка тепла, однако возможно рассмотрение этой гипотезы в сочетании с гипотезой ранней атмосферы с повышенным содержанием парниковых газов.

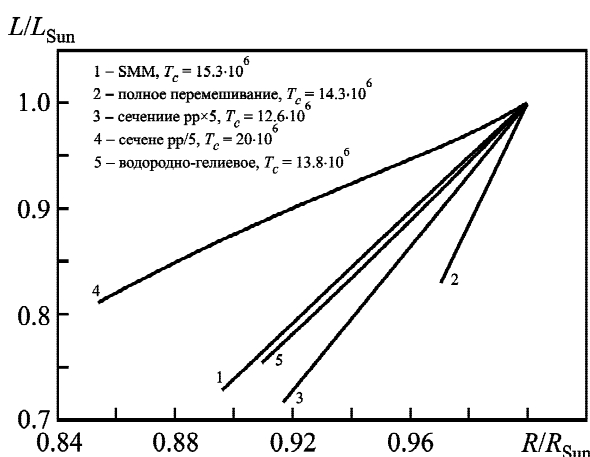


Рис. 3. Динамика солнечной светимости в последние 4.6 млрд лет в соответствии с нестандартными моделями раннего Солнца (с полным перемешиванием, разными сечениями рассеяния и составами ядра Солнца). Из работы С. В. Аюкова и др. ([1], глава 4)

4. Геомагнитный парадокс

При наличии крайне интенсивных солнечных и галактических космических лучей еще одним защитным физическим фактором, исключительно важным для развития биосферы, является наличие магнитного поля Земли. Вопрос о точном времени его возникновения до сих пор остается дискуссионным. Считается, что происхождение магнитных полей в разнообразных небесных телах, включая Землю, связано, как правило, с работой механизма динамо, который можно понимать как преобразование кинетической энергии движущейся проводящей среды в энергию магнитного поля. Палеомагнитные исследования показывают, что уже 4.2 млрд лет назад значения геомагнитного поля были сравнимы с современными. При этом имеющиеся основные теоретические модели геодинамо постулируют возникновение твердого ядра Земли и композиционной конвекции, необходимых для существования магнитного поля Земли, не ранее $1 \div 1.5$ млрд лет назад. В этом состоит так называемый “геомагнитный парадокс”.

По 25 цирконам возраста между ~ 3.26 и ~ 4.22 млрд лет регистрируется палеонапряженность в диапазоне от ≈ 4 до ≈ 29 мТл (метод Телье–Коз). Набор экспериментальных данных о магнитном поле ранней Земли приведен на рис. 4.

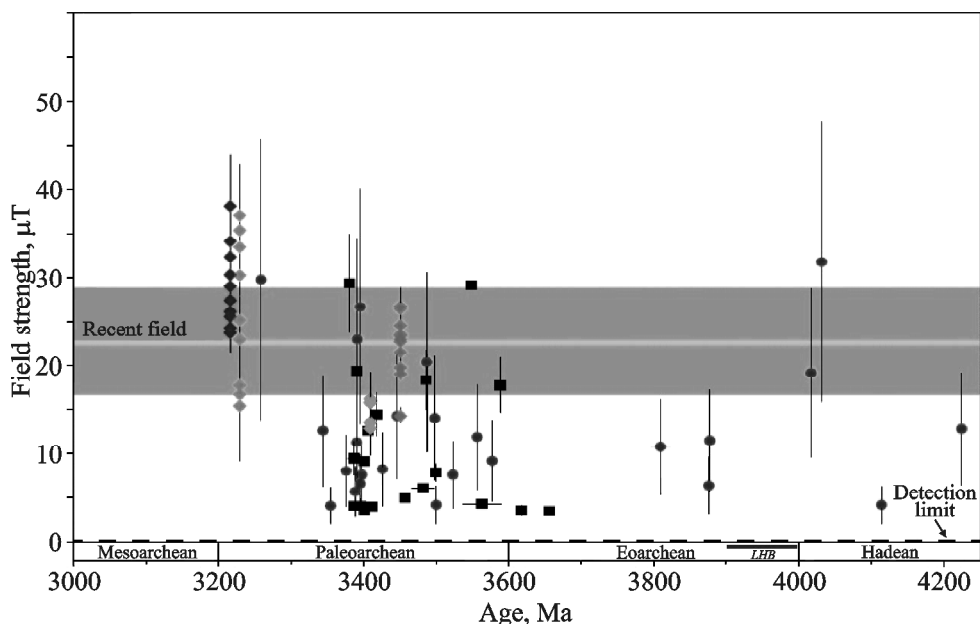


Рис. 4. Палеомагнитные данные, полученные в результате исследования австралийских цирконов возраста $3.2 \div 4.2$ млрд лет (современный уровень выделен полосой). Из работы Гардуно и др. ([2])

Видно, что напряженность геомагнитного поля, сравнимая, а иногда даже превышающая современные значения, фиксируется уже 4 млрд лет назад, т. е. задолго до начала того процесса кристаллизации жидкого ядра (не древнее 2.5 млрд лет), который якобы и обуславливает действие геодинамо за счет композиционной конвекции.

Одним из путей решения геомагнитного парадокса могло бы быть предположение об образовании твердого ядра одновременно с образованием Земли. В модели Старченко ([1], глава 9) предполагается, что твердое ядро Земли не кристаллизовалось из жидкого (как в классических динамо-моделях), а представляет собой протопланетный зародыш, на котором началась гетерогенная аккреция. Такое протоядро состоит из смеси железоникелевого сплава и силикатного хондритового вещества. Геосфера жидкого ядра формируется из внешних частей планеты и, опускаясь к центру планеты, медленно разрушает протоядро посредством поверхностной эрозии. Освобождающееся при этом силикатное вещество всплывает в жидком ядре, обуславливая композиционную конвекцию, преимущественно поддерживающую геодинамо. Модельные расчеты показывают, что гравитационная энергия от такого всплывания достаточна для перегрева подошвы нижней мантии и формирования плюмов.

Возможны и другие варианты формирования твердого ядра Земли и возникновения геомагнитного поля в самое раннее время существования нашей планеты, например:

- образование твердого ядра в открытой системе Земля–Луна,
- образование твердого ядра в результате многочисленных мелких импактов планетезималей ([1], главы 7 и 10),
- образование твердого ядра и запуск геодинамо под воздействием приливных волн массивного мигрирующего Юпитера.

5. Изотопный ксеноновый парадокс

Информация, указывающая на изотопные характеристики источника энергетической активности ядра, приводит к еще одному парадоксу – изотопному ксеноновому парадоксу.

Его суть состоит в том, что в мантийных магматических породах, предположительно связываемых с плюмами, распознается компонент первичных благородных газов в сочетании с изотопом ^{129}Xe . Отсюда следует, что в формировании плюмов принимает участие какое-то вещество, которое стало геохимически замкнутым до распада короткоживущего изотопа ^{129}I , т. е. около 4.5 млрд лет.

В то же время в этом газовом компоненте мантийных производных практически полностью отсутствует изотоп ^{136}Xe , возникающий при распаде существенно более долгоживущего ^{244}Pu . Для его удаления требуется геохимическая открытость системы как минимум 500 млн лет после начала аккреции.

Это противоречие объясняется смешением газовых компонентов двух различных источников вещества, один из которых представлен главным мантийным резервуаром, который был интенсивно дегазирован в ходе планетарной эволюции, а другой каким-то скрытым резервуаром, который сохраняет геохимическую замкнутость в течение 4.5 млрд лет, являясь поставщиком первичных благородных газов и изотопа ^{129}Xe . Предполагается, что таким вторым источником служит твердое ядро Земли, возникшее практически одновременно с формированием нашей планеты [3]. Изотопный ксеноновый парадокс служит косвенным подтверждением того, что магнитосфера Земли сформировалась практически одновременно с нашей планетой.

6. Заключение

Первый миллиард лет совместного существования Солнца и биосферы – это время парадоксов. Имеющиеся внутренне непротиворечивые теоретические физические модели зачастую противоречат скудным экспериментальным данным о биосфере, литосфере и атмосфере древней Земли. В статье систематизированы возможные пути разрешения парадокса “слабого молодого Солнца”, геомагнитного парадокса и изотопного ксенонового парадокса. Большинство из них включает в себя рассмотрение земных процессов в зависимости от общей ситуации в ранней Солнечной системе и учета роли биосферы в формировании физических условий поверхности Земли. Ранняя Земля рассматривается как открытая динамическая система в совокупности солнечно-земных связей и динамики раннего Солнца, динамики движения и формирования планет ранней Солнечной системы (например, миграции раннего Юпитера), а также в рамках изучения системы Земля–Луна.

Работа поддержана программой Президиума РАН “Эволюция органического мира и планетарных процессов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жизнь и Вселенная / Под ред. В. Н. Обридко, М. В. Рагульской. – М.: Издательство ВВМ, 2017. – 335 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Life-n-Universe.pdf>
2. Tarduno J. A., Cottrell R. D., Davis W. J., Nimmo F., and Bono R. K. A Hadean to Paleoarchean geodynamo recorded by single zircon crystals // *Science*. – 2015. – Vol. 349, Is. 6247. – P. 521–524. DOI: 10.1126/science.aaa9114
3. Starchenko S. V. and Pushkarev Y. D. Magnetohydrodynamic scaling of geodynamo and planetary protocoore concept // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49, No. 1. – P. 35–42.

REFERENCES

1. OBRIDKO, V. N. and RAGULSKAYA, M. V., eds. 2017. *Life and the Universe* [online]. Moscow, Russia: ВВМ Publ. [viewed 20 November 2017]. Available from <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Life-n-Universe.pdf>
2. TARDUNO, J. A., COTTRELL, R. D., DAVIS, W. J., NIMMO, F. and BONO, R. K., 2015. A Hadean to Paleoarchean geodynamo recorded by single zircon crystals. *Science*. vol. 349, is. 6247, pp. 521–524. DOI: 10.1126/science.aaa9114

3. STARCHENKO, S. V. and PUSHKAREV, Y. D., 2013. Magnetohydrodynamic scaling of geodynamo and planetary protocoil concept. *Magnetohydrodynamics*. vol. 49, no. 1, pp. 35–42.

M. V. Ragulskaya and V. N. Obridko

N. V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, (IZMIRAN), 4, Kaluzhskoe Hwy, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

THE SUN AND THE BIOSPHERE: THE PARADOXES OF 4 BILLION YEARS OF COEXISTENCE

Purpose: The paper discusses the influence of the early Sun and the Solar System parameters on the paleomagnetic field and the development of life on Earth.

Design/methodology/approach: The available theoretical models of the early Sun and the geomagnetic field were verified by experimental paleomagnetic, geological and biological data.

Findings: The first billion of years of coexistence of the Sun and biosphere is the time of paradoxes. One of the major being the so-called “faint young Sun paradox”. According to astrophysical models, the luminosity of the young Sun had to be by 30 % lower than it is today. This had formed the scarcity of energy coming to the Earth at which for the first 2.3 billion years the Earth surface temperature should be below the ocean water freezing point, i.e. the Earth was a frozen sphere. However, according to paleontologic data on fossilized ancient organisms, and also to geological data, the traceable ancient biosphere and ancient geotrata were formed at an average Earth surface temperature above 60°, and in the presence of a large quantity of liquid surface water. One more paradox is the essential mistiming in the occurrence of the Earth magnetic field according to theoretical models and experimental data. Theoretical models of the geodynamo state can evaluate the occurrence of a solid core about 1–1.5 billion years ago, whereas by paleomagnetic data, the geomagnetic field (comparable in value to that recently measured), measured in zircons aged to 4.2 billion years can be determined.

Conclusions: Possible ways of resolving “the weak young Sun” paradox, the geomagnetic paradox and the isotope xenon paradox are systematized. The majority of them includes consideration of the terrestrial processes depending on the general situation in the early Solar System and accounting for the biosphere role in formation of the Earth surface physical conditions. The early Earth is considered as open dynamic system in the aggregate of solar-terrestrial relationship and the early Sun dynamics, dynamics of movement and formation of planets of the early Solar System (for example, migrations of early Jupiter), as well as within the limits of studying the Earth-Moon system.

Key words: early Sun and Solar System, influence of solar radiation on the biosphere, physical conditions on the early Earth, “the faint young Sun paradox”, the geomagnetic paradox

M. V. Рагульська, В. Н. Обридо

Институт земного магнетизма, ионосферы та поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова РАН (ІЗМІРАН), Калужське шосе, 4, м. Троицьк, м. Москва, 108840, Росія

СОНЦЕ І БІОСФЕРА: ПАРАДОКСИ 4 МІЛЬЯРДІВ РОКІВ ВЗАЄМНОГО ІСНУВАННЯ

Предмет та мета роботи: В статті обговорюється вплив раннього Сонця і параметрів формованої сонячної системи на виникнення геомагнітного поля і первинної біосфери Землі. *Методи і методологія:* Виконано верифікацію наявних теоретичних моделей раннього Сонця і геомагнітного поля експериментальними палеомагнітними, геологічними й біологічними даними.

Результати: Перший мільярд років спільного існування Сонця і біосфери – це час парадоксів. Один з основних – так званий “парадокс слабкого молодого Сонця”. Згідно з астрофізичними моделями, світність раннього Сонця була на 30 % меншою, ніж сьогодні. Це формувало нестачу надходження енергії на Землю, за якої перші 2.3 млрд років температура поверхні Землі мала б бути нижчою точки замерзання океанської води, тобто Земля була замерзлим шаром. Однак, згідно з палеонтологічними даними щодо викопних древніх організмів, а також геологічними даними, доступна для вивчення древня біосфера і стародавні геопороди формувалися за середньої температури поверхні Землі понад 60°, причому за наявності великої кількості рідкої поверхневої води. Ще одним парадоксом є суттєва розбіжність часу появи магнітного поля Землі згідно з теоретичними моделями й експериментальними даними. Теоретичні моделі геодинамо дають оцінку появи твердого ядра в 1 ÷ 1.5 млрд років тому, в той час як за палеомагнітними даними визначається геомагнітне поле (порівнянне за величиною з нинішнім) в цирконах віком до 4.2 млрд років.

Висновок: Систематизовано можливі шляхи вирішення парадоксу “слабкого молодого Сонця”, геомагнітного парадоксу та ізотопного ксенонового парадоксу. Більшість з них містить у собі розгляд земних процесів залежно від загальної ситуації в ранній Сонячній системі і врахування ролі біосфери у формуванні фізичних умов поверхні Землі. Рання Земля розглядається як відкрита динамічна система в сукупності сонячно-земних зв’язків та динаміки раннього Сонця, динаміки руху і формування планет ранньої Сонячної системи (наприклад, міграції раннього Юпітера), а також в рамках вивчення системи Земля–Місяць.

Ключові слова: раннє Сонце і Сонячна система, вплив сонячного випромінювання на біосферу, фізичні умови на ранній Землі, парадокс “слабкого молодого Сонця”, геомагнітний парадокс

Стаття поступила в редакцію 26.10.2017