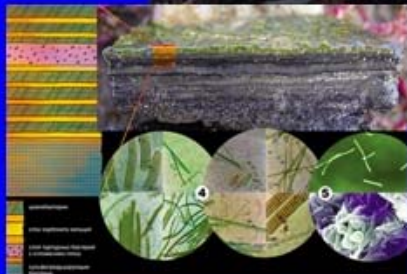


**«О странствиях вечных и о Земле...»**

**Р. Брэдли**



**«Но так уж устроен человек, что ему необходимо иметь перспективу.»**

**И. С. Шкловский, «Вселенная, жизнь, разум»**

Астрономическое Общество

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
имени Н.В. Пушкова Российской академии наук



# Жизнь и Вселенная

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

под редакцией

В.Н. Обридко и М.В. Рагульской

Москва  
2017

Настоящая монография создана по материалам коллоквиума-дискуссии «Земля на ранних этапах развития солнечной планетной системы», прошедшего 28–30 ноября 2016 года в ГАИШ МГУ (Москва). Одной из самых фундаментальных проблем в современной науке является проблема возникновения и эволюции жизни на Земле. По существу, мы даже не знаем сегодня, возникла ли она на Земле или привнесена извне. Для решения этих вопросов необходимо более точное знание о процессах на ранней Земле. В частности, важно уточнить тепловой режим в первые сотни миллионов лет существования планеты, даты возникновения жидкого и твердого ядра, дату возникновения и структуру магнитного поля, возникновения и характеристики атмосферы и водной оболочки. По всем этим вопросам существуют сильно различающиеся точки зрения. Результаты обширной трехдневной дискуссии суммированы в данной монографии.

Проведение коллоквиума и издание этой монографии стало возможным с помощью Астрономического Общества и при частичном финансировании за счет средств программы РАН «Эволюция органического мира и планетарных процессов».

#### **Рецензенты:**

**Академик РАН Н.С. Кардашев**  
**Член-корреспондент РАН А.В. Степанов**

Технический редактор Е.Л. Терёхина

Компьютерная вёрстка Е.Л. Терёхиной

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Введение

Жизнь и Вселенная <i>В.Н. Обридко</i> .....	9
--	---

### *Раздел 1*

#### Раннее Солнце

*редактор М.М. Кацова*

<b>Глава 1.</b> Влияние межзвездной среды на биосферу Земли <i>Н.Г. Бочкарев</i> .....	21
<b>Глава 2.</b> Эволюция Солнца и физические процессы на ранней стадии до Главной последовательности <i>В.А. Батурин, А.В. Орешина, С.В. Аюков, А.Б. Горшков</i>	33
<b>Глава 3.</b> Эпизодическая аккреция и вспышки молодых звезд на ранней стадии их эволюции <i>В.Н. Снытников, О.П. Стояновская</i> .....	43
<b>Глава 4.</b> Светимость Солнца на Главной последовательности. Стандартная модель и возможные вариации <i>С.В. Аюков, В.А. Батурин, А.Б. Горшков, А.В. Орешина</i>	53
<b>Глава 5.</b> Активность самого раннего Солнца <i>М.М. Кацова, М.А. Лившиц, Т.В. Мишенина, Б.А. Низамов</i>	63
<b>Глава 6.</b> О парадоксе слабого молодого Солнца <i>Е.Г. Храмова</i> .....	74

### *Раздел 2*

#### Раннее магнитное поле

*редактор Д.Д. Соколов*

<b>Глава 7.</b> Ранняя стадия возникновения Земли (интервал после возникновения Солнца, формирование жидкого ядра, формирование твердого ядра) <i>Г.В. Печерникова, В.Н. Сергеев</i> .....	91
---	----

**Глава 8.** Происхождение магнитного поля Земли и физические ограничения на работу динамо  
*Д.Д. Соколов* ..... 99

**Глава 9.** Наблюдательные, модельные и палеомагнитные основы земного и лунного гидромагнетизма  
*С.В. Старченко* ..... 105

**Раздел 3**

**Ранняя Солнечная система  
и предбиологический синтез органического вещества**  
*редактор В.М. Чепурова*

**Глава 10.** Модели происхождения Луны; ранняя история Земли и Венеры (роль приливного трения в образовании структуры планет)  
*Г.В. Печерникова, Е.Л. Рускол* ..... 117

**Глава 11.** Первичная метеоритная бомбардировка  
*А.В. Багров* ..... 128

**Глава 12.** Добиологическая эволюция органического вещества во Вселенной  
*Д.З. Вибе* ..... 139

**Глава 13.** Метеориты как катализаторы пребиотического синтеза молекул из формамида под действием ионизирующих излучений  
*М.И. Капралов, Р. Саладино, Е. Карота, Дж. Ботта, Э. Ди Мауро, Г.Н. Тимошенко, Е.А. Красавин, А.Ю. Розанов* ..... 149

**Глава 14.** О возможности доставки на раннюю Землю (пред)биологических структур при падениях примитивных астероидов  
*В.В. Бусарев* ..... 157

**Глава 15.** Ранняя атмосфера Земли в свете изучения экзопланет  
*В.И. Шематович* ..... 167

**Глава 16.** Климатические особенности распределения тепла в приземном слое атмосферы в полярных областях Земли  
*П.Г. Ковадло, А.Ю. Шиховцев, С.А. Язев* ..... 180

**Глава 17.** О миграции больших планет Солнечной системы  
*В.М. Чепурова* ..... 187

**Раздел 4**

**Жизнь на Земле и планетах**

*редактор М.В. Рагульская*

**Глава 18.** Раннее Солнце, физические условия на Земле и биосфера  
*М.В. Рагульская* ..... 195

**Глава 19.** Предбиологические синтезы органического вещества и возникновение жизни в протопланетных дисках  
*В.Н. Снытников* ..... 213

**Глава 20.** История Земли – история жизни  
*А.Ю. Розанов* ..... 223

**Глава 21.** Живое. От принципов к механизмам  
*В.А. Твердислов* ..... 231

**Глава 22.** Ранняя Земля: лавовые потоки и возможность жизни  
*М.М. Астафьева* ..... 245

**Глава 23.** Марсианские экониши и перспективы поиска в них жизни  
*Н.Э. Демидов* ..... 253

**Глава 24.** Возможная «обитаемость» марсианского реголита и обнаружения «биомаркеров» древней жизни  
*А.К. Павлов* ..... 264

**Глава 25.** Устойчивость сообществ земных микроорганизмов к воздействию физических условий подповерхностных слоев реголита Марса  
*В.С. Чепцов, Е.А. Воробьева* ..... 273

*Жизнь и Вселенная*

<b>Глава 26.</b> Физические условия и экзобиологический потенциал ледяных спутников планет-гигантов <i>М.Б. Симаков</i> .....	283
<b>Глава 27.</b> Исторические реконструкции солнечной активности и климат Земли <i>Ю.А. Наговицын</i> .....	297
<b>Глава 28.</b> Солнечная активность и техносфера <i>В.Д. Кузнецов</i> .....	307
<b>Заключение</b>	
Дискуссия .....	319
Древняя Земля: об океане, климате и жизни (замечания к дискуссии) <i>М.Я. Маров</i> .....	320
Заключение .....	324
<b>Сведения об авторах</b> .....	327
<b>Список авторов</b> .....	333

# **Введение**



## **ЖИЗНЬ И ВСЕЛЕННАЯ**

© **В.Н. Обридко**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия*

Приблизительно 9 лет назад профессор Лев Михайлович Мухин обратился ко мне с вопросом, можем ли мы сказать, какова была солнечная активность в период возникновения жизни на Земле. В то время, как и сейчас, главным направлением наших исследований была физика явлений солнечной активности. Второе важное направление, которое продолжается и сейчас – исследование воздействия явлений гелиогеофизической активности на здоровье и жизнь людей. Эти исследования актуальны и сейчас, и работы в этом направлении продолжаются. Некоторые результаты суммированы в монографии под редакцией М.В. Рагульской [1]. Однако предложение Л.М. Мухина мне показалось интересным, и оно, несомненно, было связано с теми направлениями, которыми мы уже занимались. Так мы оказались участниками программы РАН «Происхождение биосферы и эволюция гео-биологических систем». С тех пор программа несколько раз меняла свое название и сейчас она называется «Эволюция органического мира и планетарных процессов».

Уже в течение первого года нашей работы над этой программой стало ясно, что ответ на вопрос о солнечной активности на ранних стадиях возникновения солнечной системы достаточно ясен. Из сопоставления с довольно большим числом молодых солнечно-подобных звезд, как и из некоторых теоретических расчетов, ясно, что солнечная активность по любым параметрам была на 2–3 порядка более высокой, чем сейчас.

Отдельной проблемой является низкая болометрическая светимость молодого Солнца. Она должна была быть на 30% ниже, чем сегодня. Это должно было приводить к вымерзанию воды на Земле, что не подтверждается геологическими данными (так называемый «Парадокс слабого молодого Солнца»). Разрешение этого парадокса пока не ясно. Есть основания полагать, что у быстро вращающегося молодого Солнца был более сильный отток массы. В таком случае для достижения современных параметров молодое Солнце должно было иметь несколько большую массу. Молодое Солнце должно было иметь массу 1.07 нынешних масс, чтобы сохранить воду на Земле с помощью усиленного парникового эффекта. Кроме того, в

этот момент более сильная активность на Солнце должна была приводить к более сильному парниковому эффекту.

С другой стороны, более сильный отток массы должен давать на 3 порядка более сильный солнечный ветер, чем сегодня (на 2 порядка больше по плотности и более чем в 2 раза по скорости). Значительно более сильными должны были быть также корональные выбросы массы. Это должно было приводить к сжатию земной магнитосферы и эрозии атмосферы. Соответственно усилится проникновение к Земле как галактических, так и увеличенного потока солнечных космических лучей. Этот эффект может иметь катастрофические последствия для медленно вращающихся близких к Солнцу планет, где магнитосфера может сжаться до размеров порядка 1000 км. Однако он существует, хотя и в меньшей степени, и для Земли. Показано, что биологические эффекты увеличения индексов слияния клеток для различных колоний клеток коррелированы со скоростью счета нейтронов. Еще более сильные эффекты наблюдались во время больших протонных событий. Следует еще раз напомнить, что на молодом Солнце протонные события были гораздо сильнее (на несколько порядков), а поток солнечных космических лучей значительно больше, чем поток галактических космических лучей. Воздействие космических лучей на клетки и ДНК потенциально опасно для жизни. С другой стороны, изменения на генетическом уровне необходимы с точки зрения биологической эволюции.

Таким образом, было показано, что на ранней стадии эволюции все эффекты солнечной активности были значительно (на 3–4 порядка) более сильными, и поэтому зависимость, как состояния атмосферы, так и биологических эффектов от солнечной активности была гораздо сильнее. В частности, только на Земле эти эффекты не были катастрофическими. Для Венеры и Марса они были гораздо менее благоприятными [2–6].

В процессе работы стало ясно и другое – мы не можем утверждать, что жизнь вообще возникла на Земле. Значительное влияние на такую постановку вопроса оказали работы академика А.Ю. Розанова. Более того, мы не можем смоделировать условия, при которых она определенно возникает. Вероятнее всего она существовала во Вселенной всегда и является ее неотъемлемым свойством. Поэтому вопрос о возникновении жизни теперь следует переформулировать на вопрос о ее эволюции – под действием каких факторов она сегодня на Земле именно такая, какую мы видим и изучаем.

Этому вопросу была посвящена третья книга нашей серии – «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы» [7] и частично некоторые главы настоящей книги. При такой постановке вопроса задача стано-

вится настолько мультидисциплинарной, что ее поистине трудно обозреть, что и проявилось на двух коллоквиумах в 2014 и 2016 годах, проведенных с помощью Астрономического Общества.

С астрономической точки зрения трудность состоит в том, что мы знаем только одну звезду, около которой мы имеем прямые доказательства жизни. И хотя звезды сильно различаются по массе, светимости и возрасту, очень трудно отрешиться от желания принимать условия в солнечной планетной системе как эталонные. Однако некоторые свойства молодого Солнца, как уже говорилось, трудно согласовать с теми условиями жизни, которые мы считаем необходимыми. Молодое Солнце было, без сомнения, более тусклым. Мощные вспышки могли как препятствовать, развитию жизни, так и способствовать возникновению новых мутаций. Но здесь уже вступают в действие астрономы – специалисты по космогонии. Откуда вы знаете, что строение солнечной системы было такое же, как сегодня? Устойчивость солнечной планетной системы до сих пор доказана только на временном масштабе последних двух миллиардов лет. Более того, есть расчеты, которые показывают, что на самой ранней стадии Юпитер располагался значительно ближе к Солнцу и какое-то время перемещался в направлении Солнца. Только потом его дрейф сменился на обратный. Естественно в это время и внутренние планет (если они уже возникли) находились на более близких к Солнцу орбитах, чем сегодня.

Традиционная концепция жизни связывает ее существование с водой. Но откуда взялась вода на Земле в ранние периоды ее жизни? Долгое время считалось, что вода на Землю попала из метеоритов в результате ранней интенсивной метеоритной бомбардировки. Но теперь появились сомнения, что этот процесс мог быть достаточно эффективным для возникновения мирового океана. Вода могла конденсироваться из протопланетного облака или выделяться из твердой оболочки Земли вследствие внутренних геотермальных процессов. Во всяком случае, на Марсе и некоторых спутниках больших планет обнаружен лед и следы ранее имевшейся воды в жидком состоянии.

Какие-то пути к пониманию феномена жизни на Земле может дать изучение экзопланет. Долгое время все экзопланеты были больше похожи на Юпитер. Но вот, наконец, обнаружены сразу 7 экзопланет у звезды TRAPPIST-1, которая расположена от нас всего лишь на расстоянии 40 световых лет – по космическим масштабам рукой подать! Эти экзопланеты близки по типу к Земле, с твердой оболочкой. Правда, они расположены очень близко к своей звезде, на расстоянии меньше, чем радиус орбиты Меркурия, но и сама звезда невелика: это красный карлик класса М с мас-

сой 0,08 масс Солнца, радиусом 0,11 радиусов Солнца и температурой поверхности 2550°К. Планеты так близки к своей звезде, по-видимому, наиболее близкие из них постоянно обращены к звезде. В принципе, на таких планетах может существовать вода в жидком состоянии.

Сравнение физических свойств Земли и Марса может дать дополнительные сведения, а точнее сказать, ограничения, на ситуацию на ранних стадиях их развития. В той или иной мере этому вопросу посвящены несколько глав предлагаемой монографии. Кроме того, читателям можно порекомендовать два превосходных обзора [7, 8], целиком посвященных этой проблеме.

Воздействие солнечного излучения на атмосферу до конца не ясно и сегодня. Тем более оно не решено на ранних стадиях возникновения планетной системы, когда нет надежных сведений о величине магнитного поля, точных данных о планетных орбитах, их эксцентриситете и наклоне, топографии поверхности, химическом составе атмосфер. Магнитное поле, по-видимому, возникло довольно рано, но его эволюции на Земле и Марсе были совершенно разными. На Марсе оно постепенно исчезло, примерно 4 миллиарда лет назад, и атмосфера начал постепенно сдуваться под действием солнечного ветра.

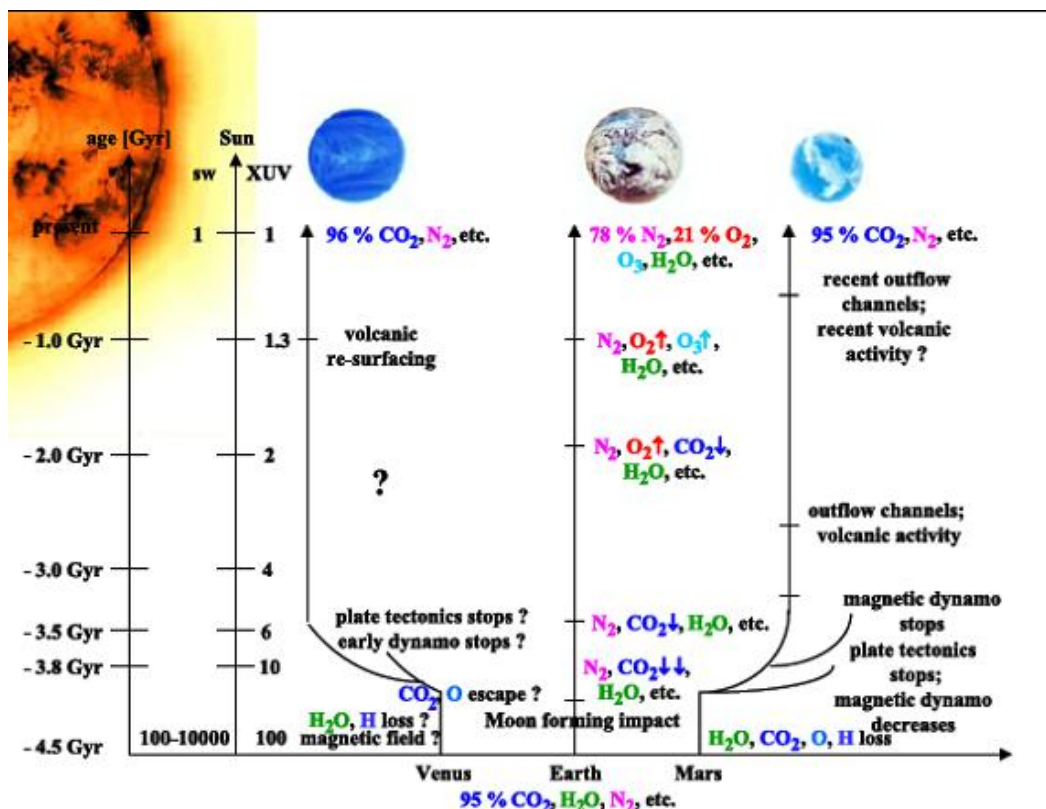


Рис. 1. Схема эволюции химического состава Венеры, Земли и Марса (рисунок взят из [8]).

Огромную роль для Земли играет существование Луны. Она возникла практически одновременно с Землей с временным разрывом не более 100 миллионов лет. Есть основания полагать, что на ней было магнитное поле, и она была очень близка к Земле. Луна удаляется от Земли со скоростью около 4 см/год, а вращение Земли замедляется. Длина суток увеличивается на 20 мксек/год за счет Луны и еще на 25 мксек/год вследствие приливного действия Солнца. Начальный период вращения Земли при этом составлял около 10 часов, а Луна была удалена не более чем на несколько тысяч километров. Это должно было приводить к очень мощному приливному взаимодействию, трещинам и разломам в земной коре, усиленной генерации магнитного поля.

Кроме того, Луна обеспечивает существенно более устойчивую орбиту Земли по сравнению с Марсом, у которого нет таких крупных спутников.

С другой стороны, у Венеры изначально период обращения был очень малым и магнитное поле не генерировалось.

Таким образом, для молодой солнечной планетной системы космические факторы были решающими, что и подтвердили в дискуссии на коллоквиуме. Однако продолжают ли космические факторы эффективно влиять на эволюцию биосферы? С одной стороны, Солнце сегодня стало значительно спокойнее. Мощных вспышек давно не было и, хотя есть работы японских коллег, говорящие о том, что сверхмощные вспышки могут происходить и на сегодняшнем Солнце, этот вопрос остается дискуссионным. Возможные вспышки сверхновых или гамма всплески, конечно, могли бы повлиять на биосферу, но эти явления не предсказуемы в будущем и с трудом обнаружимы в прошлом. Более реальная опасность – это падение крупных метеоритов, комет и астероидов. Такие падения в прошлом происходили неоднократно, и следы этих столкновений достоверно обнаружены. Однако можем ли мы утверждать, что эти столкновения значимым образом повлияли на эволюцию биосферы? Наиболее широко распространено и весьма популярно утверждение, что вымирание динозавров связано с падением гигантского метеорита. Однако это утверждение нельзя считать доказанным. Некоторые палеонтологи сомневаются в этом. Есть основания полагать, что вымирание динозавров началось задолго до вероятной даты падения метеорита. И оно отнюдь не было катастрофическим, одномоментным, хотя и довольно быстрым в геологическом масштабе времени. Возможно, дело было в накоплении внутренних эволюционных изменений, которые часто приводят к разрушению сложных нелинейных систем.

Еще одно важное явление, которое вполне возможно влияло на эволюцию биосферы – это переполусовки земного магнитного поля. Они происходят с неустойчивой периодичностью и природа их до сих пор неясна. Уже сами по себе они могут влиять на жизнь животных и их сообществ, поскольку некоторые механизмы регулирования жизни и ориентации в пространстве связаны с магнитным полем. Однако еще более важным является то, что во время переполусовок ослабляются защитные функции магнитного поля. Дело в том, что активность современного Солнца, конечно, ослабела по сравнению с ранним периодом, но отнюдь не исчезла совсем. Солнечные вспышки дают значимый поток солнечных космических лучей (СКЛ). В качестве примера можно упомянуть ситуацию в августе 1972 года, когда на Солнце произошли 3 мощных (хотя и не супермощных) вспышки. По независимым подсчетам как американских, так и российских астрофизиков, если бы в это время осуществлялась миссия «Аполлон», (то есть космонавты на Луне остались бы без магнитной защиты), они могли бы получить смертельную дозу радиации. Кроме того, существуют еще и галактические космические лучи (ГКЛ), которые гораздо энергичнее. На современной Земле их влияние почти не чувствуется, с некоторой долей вероятности они могут влиять вариации климата и на здоровье людей. Но в периоды переполусовок совместное действие СКЛ и ГКЛ может быть вполне значимым. Дополнительным фактором, усугубляющим ситуацию, может быть то, что при переполусовке магнитное поле не только сильно ослабляется, но, по-видимому, и меняет структуру. При этом может возникнуть ситуация, облегчающая доступ космических частиц к Земле.

Тем не менее, поскольку эволюция биосферы происходила с переменной скоростью, и палеонтологи находят целый ряд периодов, когда она ускорялась, есть естественное искушение связать эти моменты с воздействием внешних факторов. Кроме упомянутых выше, это могут быть также прохождения через галактические рукава, при которых возможно повышение потока космических лучей. Существуют также так называемые циклы Миланковича, определяемые лунно-солнечной прецессией (период около 25765 лет), колебаниями угла наклона земной оси к плоскости её орбиты (период около 41000 лет), колебаниями эксцентриситета орбиты Земли (период около 93000 лет) и перемещениями перигелия орбиты Земли и восходящего узла (периоды соответственно 10 и 26 тысяч лет). Наконец, существуют глобальные вариации собственно земного происхождения, из которых главными следует признать оледенения и движение материков.

Воздействие этих и многих других факторов на биосферу было обсуждено на нашем предыдущем коллоквиуме и опубликовано в сборнике «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы» [9]. Эти сопоставления часто бывают весьма убедительными, однако остаются две трудности. Во-первых, датировки быстрых изменений в эволюции биосферы, так же как и датировки космических событий, имеют очень большую погрешность. Поэтому признать их безоговорочно совпадающими нельзя. Во-вторых (и, может быть, в главных) большинство этих сопоставлений опираются только на близость событий по времени. Пока нет скольконибудь надежных физических механизмов и расчетов, подтверждающих эти сопоставления.

Очередной коллоквиум-дискуссию Астрономического общества мы посвятили проблеме "Земля на ранних этапах развития солнечной планетной системы". Основная тематика наших работ по программе несколько изменилась. По существу с самого начала вопрос о том, что собственно такое жизнь, несколько изменился. Теперь ясно, что жизнь неотделима от существования материи. Поэтому задавать вопрос, когда и как возникла жизнь, это, практически, то же самое, что спрашивать, когда и как возникла материя. Жизнь существует в разных формах и непрерывно эволюционирует. Для решения этих вопросов необходимо более точное знание о процессах на ранней Земле. В частности, важно уточнить тепловой режим в первые сотни миллионов лет существования планеты, даты возникновения жидкого и твердого ядра, дату возникновения и структуру магнитного поля, возникновение и характеристики атмосферы и водной оболочки. По всем этим вопросам существуют сильно различающиеся точки зрения. В процессе дискуссий стало ясно, что проблема выходит за пределы Земли и даже солнечной планетной системы. Более того, биосфера не является пассивным объектом, испытывающим воздействие космических агентов. На самом деле биосфера сама участвует в формировании окружающей среды. Достаточно вспомнить, что весь кислород на Земле – биогенного происхождения. Для его поступления в атмосферу сначала на эволюционной ветви должны появиться бактерии, разлагающие окислы породы до чистого кислорода. А затем сотни миллионов лет они должны в качестве отходов заселять атмосферу до нужной концентрации газа. Затем уже кислород, окисляя горные породы, видоизменяет геосферу.

При написании этого введения меня не покидала ощущение очень близкого торжества – встречи с жизнью на других планетах. И хотя это, скорее всего, не будет встречей с «братьями по разуму», а обнаружение

внеземных микроорганизмов, тем не менее, это будет праздник для астробиологии как науки, утверждающей существование жизни во Вселенной.

Так возникла эта книга. Она не является просто сборником докладов. Каждая глава писалась как часть монографии. Есть главы, которые не опираются непосредственно на прочитанные доклады, есть и новые главы.

Из дискуссии мы включили только выступление академика М.Я. Марова, поскольку в нем содержатся несколько очень важных положений.

Мне хотелось назвать эту книгу, используя высказывание академика А.Ю. Розанова «История жизни – история Земли». Однако затем мы пришли к выводу, что более точным будет название «Жизнь и Вселенная» с тем, чтобы подчеркнуть всеобщий характер этого феномена – Жизнь.

### Литература

1. Биотропное воздействие космической погоды / под редакцией *М.В. Рагульской*. 2010, СПб, изд-во ВВМ, 330 с.
2. *M.M. Katsova, M.A. Livshits, W. Soon, S.L. Baliunas, D.D. Sokoloff*. Differential rotation of some HK-Project stars and the butterfly diagrams *New Astronomy* 15 (2010) 274–281.
3. *Кацова М.М., Лившиц М.А.* Возможный эволюционный статус солнечной активности Всероссийская ежегодная конференция по физике солнца год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика – 2009, труды, СПб, 2009, с.231-240.
4. *Обридко В.Н.* Крупномасштабная структура и «активные долготы» Всероссийская ежегодная конференция по физике солнца год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика – 2009, труды, СПб, 2009, с.331-340.
5. *Кацова М.М., Лившиц М.А.* Причины отличий циклической активности Солнца от циклов на других поздних звездах. Симп. «Циклы активности на Солнце и звездах», Москва, 2009.
6. *Обридко В.Н.* Введение. Циклы активности на Солнце и некоторые особенности 23 цикла. «Циклы активности на Солнце и звездах», Москва, 2009.
7. *V. Dehant, H. Lammer, Y.N. Kulikov, J.-M. Grießmeier, D. Breuer, O. Verhoeven, Ö. Karatekin, T. Van Hoolst, O. Korablev, P. Lognonné*. Planetary Magnetic Dynamo Effect on Atmospheric Protection of Early Earth and Mars *Space Sci Rev* (2007) 129: 279–300 DOI 10.1007/s11214-007-9163-9
8. *Yuri N. Kulikov, Helmut Lammer, Herbert I.M. Lichtenegger, Thomas Penz-Doris Breuer, Tilman Spohn, Rickard Lundin, Helfried K. Biernat*. A Comparative Study of the Influence of the Active Young Sun on the Early Atmospheres of Earth, Venus, and Mars *Space Sci Rev* (2007) 129: 207–243 DOI 10.1007/s11214-007-9192-4
9. Космические факторы эволюции биосферы и геосферы / отв. редактор *В.Н. Обридко*. Астрономическое общество, 2014, 231 с. ISBN 978-5-9651-0861-9

## Приложение

Поскольку во многих главах авторы относят события к основным эпохам развития геосферы и биосферы, мы сочли полезным дать как приложение к введению эту схему.

Эра	Эпоха/Период	Возраст	Ключевые события (возраст в миллионах лет)
ТРЕТИЧНЫЙ Кайнозой	Четвертичный период	1,75-0	Появление Человека разумного и Человека прямоходящего
	Плиоцен	5,30-1,75	Появление Человека умелого
	Миоцен	23,5-5,30	3.2: Люси ( <i>Australopithecus afarensis</i> – Эфиопия) 7: Древнейшие ископаемые гоминиды (Тумай, Чад)
	Олигоцен	33,7-23,5	Подъем Альпийской цепи
	Эоцен	53-33,7	Диверсификация видов млекопитающих
	Палеоцен	65-53	65: 5-е Великое вымирание (исчезновение 65% видов)
ВТОРИЧНЫЙ Мезозой	Меловой период	135-65	135: Появление покрытосеменных (цветковых растений)
	Юрский период	203-135	150: Появление птиц ( <i>Археоптерикс</i> )
	Триас	250-203	215-203: 4-е Великое вымирание (исчезновение 75% видов) 220: Появление динозавров 230: Появление млекопитающих
ПЕРВИЧНЫЙ Палеозой	Пермский период	295-250	250: 3-е Великое вымирание (исчезновение 95% видов)
	Каменноугольный период	355-295	Появление первых сухопутных животных (рептилий)
	Девон	410-355	355: 2-е Великое вымирание (исчезновение 75% видов) 365: Появление тетраподов («четвероногих рыб»)
	Силур	435-410	430: Первые ископаемые сухопутные растения
	Ордовик	500-435	435: 1-е Великое вымирание (исчезновение 85% видов) 450: Появление насекомых 460: Первые ископаемые челюстные позвоночные (рыбы)
	Кембрий	540-500	535: Первые ископаемые моллюски 540-500: Эволюционный взрыв: появление почти всех современных групп животных

<b>Докембрий</b>	<b>Протеозой</b>	<b>2500-540</b>	<p><b>565-545:</b> Распространение эдиакарской биоты: появление странных животных, часто большого размера</p> <p><b>570:</b> Первые ископаемые организмы с билатеральной симметрией</p> <p><b>2100:</b> Первые макроскопические организмы (видимые невооруженным глазом). Эволюционная линия, ведущая к образованию растений, отделилась от линии, ведущей к образованию животных и грибов</p>
	<b>Архей</b>	<b>4550-2500</b>	<p><b>2680:</b> Первые эукариоты (организмы, клетки которых содержат ядро)</p> <p><b>3450:</b> Древнейшие известные ископаемые: строматолиты</p> <p><b>3850:</b> Древнейшие геохимические признаки жизни на Земле</p> <p><b>Около 4400:</b> Образование Луны путем столкновения протопланеты с Землей</p>

# ***Раздел 1***

## **Раннее Солнце**

*редактор М.М. Кацова*



## *Глава 1*

# **ВЛИЯНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ НА БИОСФЕРУ ЗЕМЛИ**

© **Н.Г. Бочкарев**

*Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия*

Параметры МЗС определяют степень проникновения в Солнечную систему галактических космических лучей, межзвездных атомов. Их воздействие на Землю значительно изменяется по мере прохождения Солнца через различные области МЗС. В некоторых случаях такое воздействие может вызвать в окружающей среде сильные изменения, существенно влияющие на жизнь на Земле.

### **1. Межзвездная среда**

Межзвездная (МЗ) среда (МЗС) – это вещество, которое заполняет пространство между звездами внутри галактик.

Основные компоненты межзвездной среды:

1. Газ (атомы, молекулы, ионы, электроны) ~ 99% массы
2. Пыль ~ 1% массы
3. Магнитные поля ~ 0% массы
4. Космические лучи ~ 0% массы
5. Электромагнитное излучение ~ 0% массы

Все компоненты МЗС (любая их пара) взаимосвязаны. В большинстве случаев взаимодействие сильное.

Плотности энергии, заключенные в кинетических движениях газа, в магнитных полях и в космических лучах одного порядка величины. Поэтому ситуация крайне неустойчивая: одни структуры все время перетекают в другие, все как бы кипит, бурлит. Но характерное время этого бурления достаточно большое: масштабы соответствуют парсекам, а скорости звука – порядка километра в секунду, то есть, развитие процессов занимает миллионы лет.

На рис. 1 слева показана фотография центральной части типичной спиральной галактики, подобной нашей. Строение ее достаточно сложное. Бросаются в глаза спиральные рукава, "прорисованные" молодыми горячими звездами, вызывающими свечение окружающего их газа. Темные прожилки – результат поглощения света пылью. МЗС напоминает пену с "пузырями" диаметром порядка 300 пк, называемыми сверхоболочками. Каждая из них содержит область звездообразования, в которой недавно происходило или еще продолжается рождение массивных звезд.

Сверхоболочки также имеют сложную структуру. На рис. 2 схематически показан поперечный разрез Местной сверхоболочки [Бочкарев, 1992], около внешнего края которой расположено сейчас Солнце (отмечено справа внизу кружком с точкой внутри).

В МЗС можно выделить основные структурные образования или компоненты, перечисленные в таблице 1. Важнейшие из них – корональный газ с плотностью тысячные доли частицы в кубическом сантиметре и температурой порядка миллиона градусов, зоны (области) ионизованного водорода (HII) низкой плотности и теплые зоны HII, теплые зоны нейтрального водорода (HI), темные облака, глобулы и т.д. Более половины массы МЗС содержится в гигантских молекулярных облаках – наиболее плотной и холодной составляющей МЗС. Межзвездная пыль практически равномерно перемешана с газом.

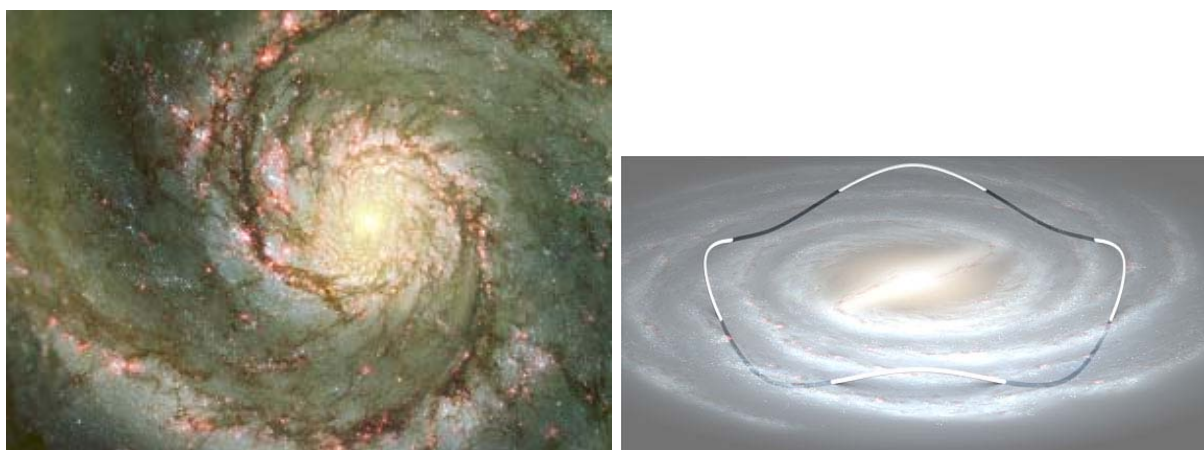


Рис. 1.

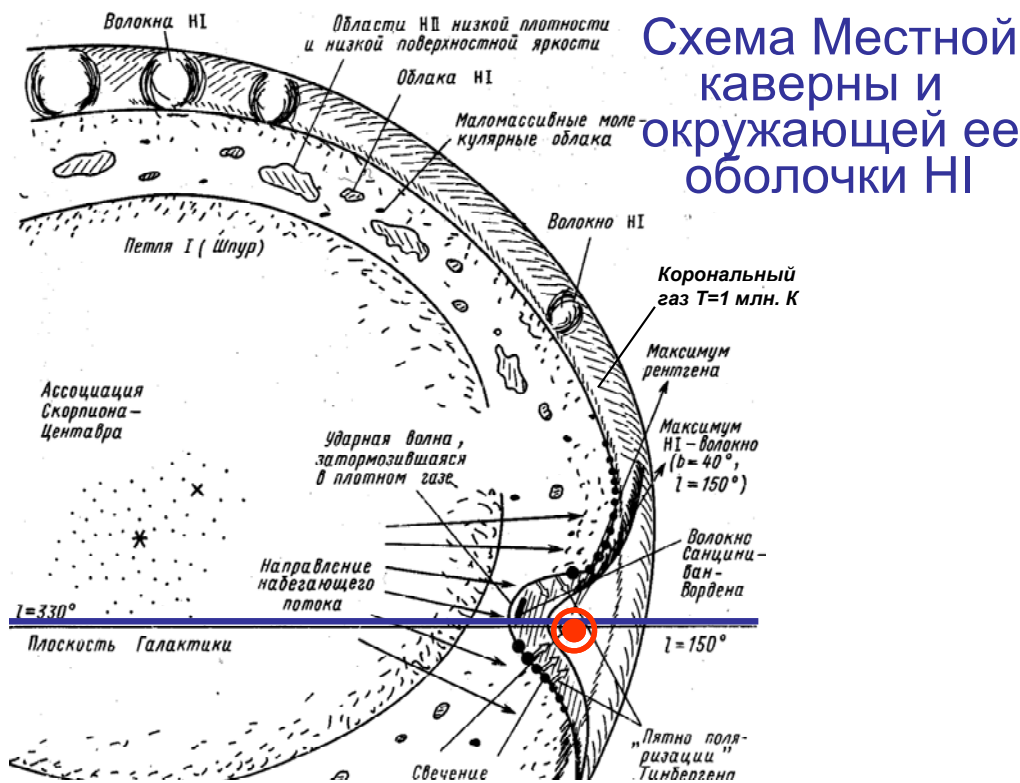


Рис. 2.

**Таблица 1.** Основные структурные компоненты межзвездной среды [Бочкарев, 1991]

Компоненты МЗС	Температура, К	Плотность $n$ , см <sup>-3</sup>	Масса, $M_{\odot}$	Размер, пк	Доля объема
Корональный газ	$\sim 5 \times 10^5$	$\sim 0.003$	-	-	$\sim 0.5$
Зоны НII низкой плотности	$\sim 10^4$	$\sim 0.3$	-	-	$\sim 0.1$
Межоблачная среда (теплые области НI)	$\sim 10^4$	$\sim 0.1$	-	-	$\sim 0.4$
Облака НI	$\sim 80$	$\sim 10$	$\sim 100$	$\sim 10$	$\sim 0.01$
Большие глобулы	$\sim 10$	$\sim 10^4$	$\sim 20$	$\sim 0.3$	$\sim 10^{-4}$
Области НII	$\sim 10^4$	$\sim 30$	$\sim 300$	$\sim 10$	$\sim 3 \times 10^{-4}$
Гигантские молекулярные облака	$\sim 20$	$\sim 300$	$\sim 3 \times 10^5$	$\sim 40$	
Уплотнения в молекулярных облаках	$\sim 6$	$\sim 10^5$	$\sim 100$	$\sim 0.5$	
Мазерные конденсации	$\geq 100$	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-5}$	

## 2. Положение и движение Солнца в Галактике

Солнце движется вокруг центра Галактики по орбите, напоминающей круговую, но искаженной гравитационными полями спиральных рукавов [Gies, Helsel, 2005]. При этом расстояние Солнца от центра Галактики колеблется около значений 8–8.5 килопарсеков. Солнце совершает полный оборот вокруг центра примерно за 200–250 млн. лет (т.н. галактический год). При этом оно поочередно то немного (на 70 пк) поднимается над плоскостью Галактики, то настолько же уходит под нее (рис. 1 справа).

Как упомянуто выше, в настоящее время Солнце находится в одной из сверхоболочек, называемой Местной сверхоболочкой [Бочкарев, 1993], недалеко от ее края. На рис. 2 показано положение сравнительно молодой звездной ассоциации Скорпиона-Центавра. Совокупное действие звездных ветров и взрывов наиболее массивных звезд этой ассоциации как сверхновых выметело межзвездный газ на расстояние 170 парсеков вокруг ассоциации. Внутри выметенного газа остаются обрывки газовых структур (облачков, волокон, уплотнений), которые были там до того, как сформировалась Местная сверхоболочка. Горячий газ звездных ветров и взрывов сверхновых обтекает их, не успевая разрушить. Солнце находится вблизи горячего газа, но в теплом разреженном газе.

## 3. Взаимодействие солнечного ветра и МЗС

Солнце движется сквозь окружающую его МЗС со скоростью примерно 20 км/с. Это соответствует тому, что Солнечная система обдувается межзвездным ветром. С другой стороны, Солнце порождает свои корпускулярные потоки – солнечный ветер. Заряженные частицы обоих ветров, сталкиваясь, образуют двухслойную ударную волну, с одной стороны от которой находится межзвездный газ, а с другой – затормозившийся удар-

ной волной солнечный ветер (рис. 3). Эта область называется гелиопаузой, а ограниченное ей пространство – гелиосферой.



**Рис. 3.**

Нейтральные атомы МЗС движутся по-другому. Они, почти не чувствуя ударной волны, пролетают сквозь нее и наблюдаются в основном по рассеянному ими излучению Солнца в сильнейших ультрафиолетовых спектральных линиях водорода  $L\alpha$  1216 Å,  $L\beta$  1025 Å и нейтрального гелия He I 584Å, образующему фоновое излучение неба в этих линиях. Фон неба в линии  $L\alpha$  был открыт В.Г. Куртом [1965]. В последствии анализ фона неба в этих линиях позволил определить параметры МЗС в ближайших окрестностях гелиосферы.

Оказалось, что межзвездный газ в ближайших окрестностях Солнца, но вне гелиосферы, имеет температуру около 8000К, плотность – несколько десятых долей частицы в кубическом сантиметре, степень ионизации примерно 50%. Т.о., Солнечная система расположена в теплой области HI, но очень близко к границе с горячим газом.

Нейтральные атомы МЗС проникшие внутрь гелиосферы постепенно ионизируются ультрафиолетовым излучением Солнца и реакциями перезарядки с ионами солнечного ветра. Став заряженными, такие частицы увлекаются назад солнечным ветром, образуя поток т.н. «захваченных ионов». Когда эти ионы приближаются к внутреннему краю двухслойной ударной волны, они ускоряются на фронте ударной волны и образуют т.н. аномальную компоненту космических лучей. В отличие от преимущественно релятивистских частиц галактических КЛ, аномальные КЛ являются субрелятивистскими. Они сильнее взаимодействуют с атомами и молекулами, в частности с веществом верхних слоев планетных атмосфер (если достигают их).

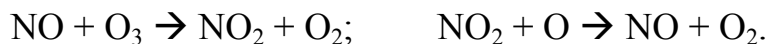
Статистические данные о распределении МЗ облаков по размерам и плотности показывают, что Солнце за 4.5 млрд. лет путешествия в Галак-

тике около 130 раз (т.е. 7–8 раз за галактический год) прошло сквозь МЗ облака с концентрацией  $n > 100$  частиц в кубическом сантиметре и примерно 16 раз – сквозь облака с  $n > 1000 \text{ см}^{-3}$  [Talbot, Newman, 1977; Pavlov et al., 2005].

#### **4. Влияние КЛ на содержание озона в атмосфере Земли\***

В настоящее время радиус гелиосферы составляет примерно 100 астрономических единиц ( $1 \text{ а.е.} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ ). Когда Солнечная система погружается в МЗ облако, размер гелиосферы убывает до 1–2 а.е. Такое сжатие практически не изменяет параметры проникающих в нее галактических космических лучей. В тоже время энергия аномальных космических лучей, ускоряющихся на внешней границе гелиосферы, возрастает в сотни раз. В результате верхняя атмосфера Земли, по крайней мере, в полярных районах, облучается аномальными космическими лучами в сотни раз сильнее, что приводит в современной азотно-кислородной атмосфере Земли к ионизации азота, и содержание окислов азота в ней возрастает в сотни раз.

Цикл реакций разрушения озона:



В нем окислы азота выступают в качестве катализатора. В результате содержание озона сильно убывает.

Характерное время, за которое содержание озона достигает нового стационарного состояния, составляет порядка 5–10 лет [Pavlov et al., 2005]. Это примерно вдвое больше, чем в других случаях изменения содержания озона космического происхождения:

- падение на Землю крупных тел [Prinn, Fegley, 1987];
- сверхмощные солнечные вспышки [Jackman et al., 2000];
- вспышки сверхновых [Gehrels et al., 2003];
- гамма-вспышки [Melott et al., 2004],

когда для восстановления озона требуется лишь 1–2 года.

В работе [Pavlov et al., 2005] рассчитаны модельные распределения озона по поверхности Земного шара при современном размере гелиосферы и для случая, когда гелиосфера сильно обжата окружающим межзвездным газом с концентрацией  $100 \text{ см}^{-3}$ . Оказалось, что в приполярных районах количество озона уменьшается в 2–4 раза; в экваториальных районах – меньше, всего примерно на 40%.

Смены полярности магнитного поля Земли и магнитные экскурсы, когда дипольная компонента магнитного поля на время 1–10 тысяч лет сильно ослабевает, приближаясь к нулю, хорошо документированы и происхо-

---

\*В этом разделе в основном следуем работе [Pavlov et al., 2005].

дят в среднем раз в 200 тыс. лет, хотя были эпизоды постоянной полярности длительностью десятки миллионов лет.

Характерное время пребывания Солнечной системы внутри гигантского молекулярного облака порядка 1 млн. лет. За это время смена полярности магнитного поля Земли обычно успевает произойти несколько раз. И каждый раз озоновая защита биосферы ослабевает на тысячи лет одновременно на всей поверхности Земли, включая экваториальные области. Это, естественно, **ослабляет биосферу и может приводить к массовому вымиранию видов.**

Недавно удалось проследить, сквозь какие структуры МЗС проходило Солнце в последние несколько десятков миллионов лет [Wyman, Redfield, 2013]. Для этого были выполнены наблюдения МЗ линий поглощения в спектрах многих звезд, расположенных на разных расстояниях от нас в направлении, откуда пришло Солнце в своем движении вокруг центра Галактики. Это дало возможность определить пространственное распределение МЗС в данном направлении. Зная скорость движения Солнца в Галактике, легко найти, когда Солнечная система проходила через ту или иную структуру МЗС. Из рис. 4, заимствованном из статьи [Wyman, Redfield, 2013], видно, что последние 10 млн. лет МЗ вещества вблизи нас практически не было, то есть, мы двигались сквозь горячий корональный газ. Но в более далеком прошлом Солнечную систему окружали более плотные участки МЗС.

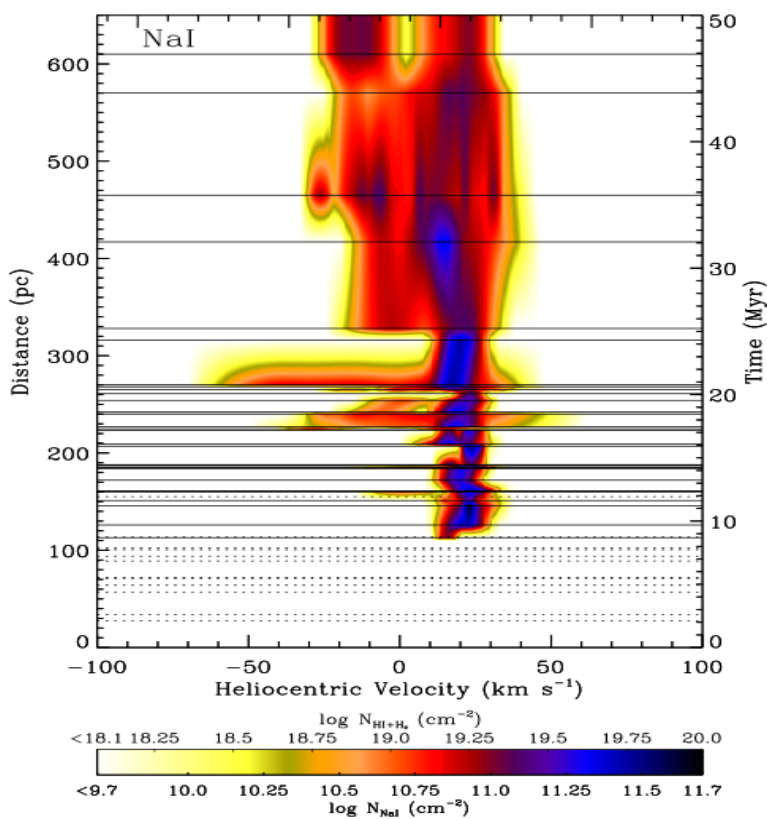


Рис. 4.

## 5. Вариации потока галактических космических лучей

Галактические космические лучи низких энергий распределены в Галактике неравномерно. Это следует хотя бы из того, что среди источников гамма-излучения значительную часть составляют молекулярные облака. В них выше плотность космических лучей, которые, взаимодействуя с межзвездным веществом, рождают гамма-кванты. Молекулярные облака расположены преимущественно в спиральных рукавах Галактики. Поэтому в рукавах повышено содержания космических лучей низких энергий. При движении Солнечной системы в Галактике она попадает в области с различной плотностью космических лучей.

Поскольку спиральный узор Галактики вращается вокруг ее центра в ту же сторону что и Солнце, интервалы времени между последовательными пересечениями Солнцем спиральных рукавов превосходят продолжительность галактического года, разделенную на число рукавов (их в Галактике 4). Солнце расположено в Галактике недалеко от так называемого радиуса коротации – расстояния от центра, на котором угловые скорости движения звезд и спиральной структуры совпадают. Интервалы времени между прохождением спиральных рукавов определяются разностью угловых скоростей движения Солнца и спирального узора. С учетом неопределенности угловых скоростей вращения Солнца и спирального узора вокруг центра Галактики, Солнце за последние 0.5 млрд. лет пересекло от 2 до 4 спиральных рукавов [Gies, Helsel 2005].

Сопоставление таких явлений на Земле, как эпохи похолоданий и потеплений, великих оледенений, массовых вымираний видов с моментами прохождения Солнцем спиральных рукавов, а также с вариациями потока галактических космических лучей, заставляет предположить, что климат нашей планеты зависит от этих явлений.

На рис. 5, взятом из работы [Shaviv, 2003], приведена подборка имеющихся данных о перечисленных явлениях. Этот рисунок позволяет судить о степени корреляции положения Солнца относительно спиральных рукавов Галактики и событиями на Земле.

На рис. 5 по горизонтальной оси отложено время в миллионах лет, отсчитанное от настоящего момента (0) до 1 млрд лет в прошлое.

На верхней панели А даны интервалы времени, которые Солнце проводило в спиральных рукавах. Они рассчитаны с использованием наиболее вероятной величины разности угловых скоростей вращения спирального узора и Солнца вокруг центра Галактики ( $\Omega_p - \Omega_{\odot} = -11.0 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ ). Приведены названия спиральных рукавов.

Панель В описывает вариации достигающего Солнечной системы потока галактических КЛ, рассчитанные в рамках диффузионной модели их распространения (в единицах современного значения потока КЛ).

Сплошная линия на панели С показывает вариации температуры поверхности моря в тропических широтах по отношению к сегодняшним значениям.

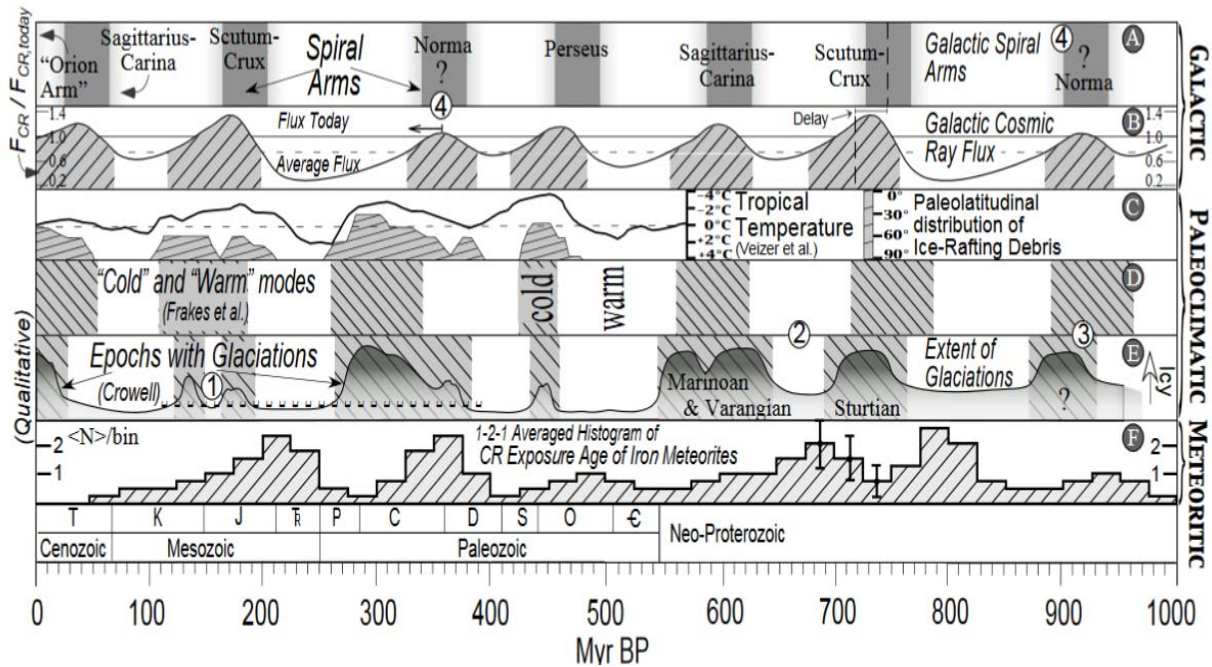


Рис. 5.

Панели D и E качественно описывают периоды оледенений по данным авторов, указанных на панелях.

На панели F показана сглаженная гистограмма возрастов железных метеоритов, измеренных по дозе полученного ими облучения [Exposure Ages, см. Shaviv, 2003].

## 6. Роль эволюции Галактики

Время, прошедшее с образования Солнечной системы (4.6 млрд лет), составляет заметную долю возраста нашей Галактики (около 13 млрд лет). Поэтому физические условия в межзвездной среде, которая окружает Солнечную систему и сквозь которую она движется, могли испытать значительные изменения.

Важнейшую роль в эволюции молодых галактик играл мерджинг, т.е. их слияние (гл. обр., поглощение маленьких большими). Вызванные мерджингом возмущения часто вызывают в галактиках вспышку звездообразования. Процесс бурного рождения звезд усиливает генерацию КЛ и изменяет параметры межзвездной среды. В результате изменяется облучение космическими лучами поверхности Земли. Поэтому надо изучить возможное влияние эволюции Галактики на биосферу.

Отсутствие сильных мерджингов, однако, не означает отсутствия эволюции Галактики. По мере старения Галактики убывает количество меж-

звездного вещества и увеличивается доля тяжелых элементов в нем, изменяются доли объема, которые заполняют различные структуры, перечисленные в таблице 1. Но перечисленным процессам, приводящим к исчерпанию запасов МЗ вещества галактики и как следствие снижения всевозможных проявлений активности, то есть к "старению" галактик, противостоит приток в галактики межгалактического водорода, играющего роль топлива, которое "омолаживает" галактики, поддерживает них звездообразование и другие активные процессы [Сильченко, 2017].

К настоящему времени, наша Галактика, как и большинство других окружающих нас галактик уже давно миновали бурную юность – еще до того как сформировалась Солнечная система – колыбель биосферы Земли. За последние 5 млрд лет Галактика не испытывала сильных мерджингов и не будет испытывать их еще несколько миллиардов лет. Но затем нашей Галактике предстоит пережить "вторую молодость". Поглощение Магеллановых облаков Галактикой завершится через 4 млрд лет. Столкновение с галактикой М31 (туманность Андромеды) произойдет через 5 млрд лет.

### **7. Другие агенты влияния МЗС на биосферу**

Ниже перечислены некоторые другие формы влияния межзвездной среды на биосферу.

Помимо рассмотренного выше влияния МЗ газа на биосферу межзвездная пыль также может оказывать влияние на биосферу за счет различных процессов. Во-первых, при достаточной плотности пыли она может вызывать поглощение солнечного света на пути до планеты. Этот механизм впервые был предложен Ф. Хойлом в его фантастическом произведении "Черное облако" и количественно рассмотрен в [Pavlov et al., 2005b]. Кроме того, при достаточной запыленности верхней атмосферы планеты поглощение пылью электромагнитного излучения приводит к нагреву этих слоев, что также может сказываться на климате планеты. Для биосфер планет с очень малым количеством питательных веществ существенным фактором, пополняющим питательные ресурсы биосферы, могут оказаться органические молекулы, замороженные в пылинки и приносимые вместе с ними на поверхность планеты. Гипотезу о роли такого влияния на современную биосферу Марса высказал Павлов и др. [2017].

Несколько других факторов, влияющих на биосферу, перечислены, в частности, в следующих работах: Atri and Mellot [2014], Павлов и др., [2011], некоторых других.

И, наконец, напомним, что в процессе эволюции Солнца изменяются параметры солнечного ветра и солнечных космических лучей. Эти факторы влияли, в частности, на размер гелиосферы и, соответственно, на проникновение внутрь Солнечной системы галактических космических лучей.

## 8. Круговая поляризация излучения массивной протозвезды как возможный источник гомохиральности жизни на Земле

Причина возникновения гомохиральности жизни на Земле до сих пор не ясна. Недавно появились новые наблюдательные данные, которые, возможно, помогут решить эту проблему. Впервые удалось измерить распределение по картинной плоскости круговой поляризации инфракрасного излучения (2 мкм) в ближайшей к нам области интенсивного звездообразования – туманности Ориона. Около массивной протозвезды BN/KL обнаружен примыкающий к ней протяженный участок неба размером  $0.4 \text{ пк} = 1.2 \text{ св. года}$ , излучение которого имеет значительную круговую поляризацию достигающую  $\sim 10\%$  (см. рис. 6 взятый из [Fukue et al., 2010]).

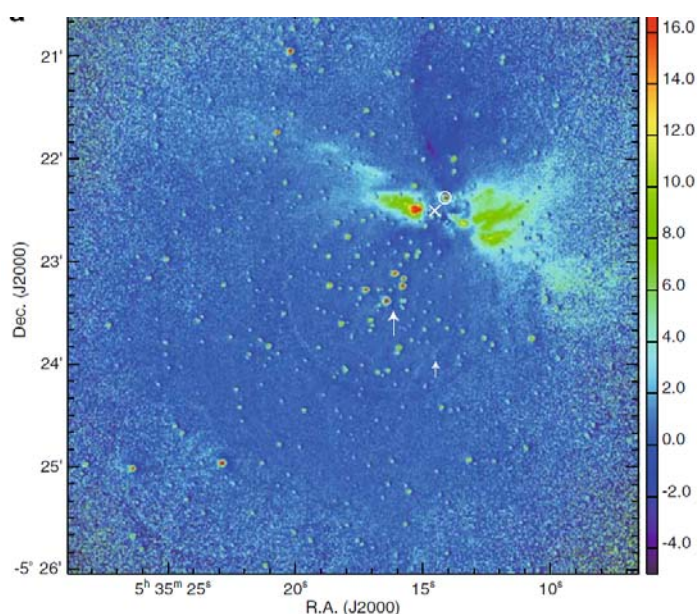


Рис. 6.

Этот результат указывает на возможный источник происхождения гомохиральности жизни на Земле. Действительно, изотопный состав солнечной системы говорит о том, что на раннем этапе ее формирования рядом произошел взрыв массивной сверхновой (см., например, [Витязев, Печерникова, 2009]). Это в свою очередь означает, что за несколько миллионов лет до взрыва протопланетный диск, из которого сформировалась Солнечная система, должен был испытать сильное облучение излучением той же звезды, когда она еще только формировалась. Если эта протозвезда испускала свет со степенью круговой поляризации характерной для протозвезды BN/KL, то подвергнутый такому облучению рацемический набор молекул протопланетного диска мог приобрести небольшую преимущественную хиральность [Modica, 2014]. Последующие химические реакции, вероятно, способны усилить ее [Klussmann, 2006], в том числе в условиях протопланетного диска.

Если гомохиральность жизни возникла за счет этого механизма, то в планетных системах вокруг различных звезд хиральность должна быть разной.

### Литература

- Бочкарев Н.Г.* (1991) Основы физики межзвездной среды. Москва, Издательство МГУ, 352 с.
- Бочкарев Н.Г.* (1992) Местная межзвездная среда. Москва, "Наука", 192 с.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В.* (2009). Ранняя Земля в тесном окружении молодых звезд. В: Проблемы происхождения жизни. Москва, ПИН РАН, с. 131-157.
- Павлов А.К., Воробьева Е.А., Чепцов В.С., Цурков Д.А. Берденникова А.В.* (2017). Возможная «обитаемость» марсианского реголита и обнаружения «биомаркеров» древней жизни. В этой книге.
- Павлов А.К., Остряков, В.М., Васильев Г.И.* (2011). Плотные межзвездные облака и ионизация атмосферы и грунта Марса. *Астрономический вестник*, т. 45, вып. 1, с. 1–4.
- Сильченко О.К.* Происхождение и эволюция галактик. *Фрязино, Век 2*, 2017, 224 с.
- Atri D., Melot A.* (2014) Cosmic rays and Terrestrial Life: a Brief Review. *Astroparticle Physics*, V. 53, pp. 186-190.
- Fukue T., Tamura M., Kandori R., Kusakabe N., Hough J.H., Bailey J., Whittet D.C.B., Lucas P.W., Nakajima Ya., Hashimoto J.* (2010) Extended High Circular Polarization in the Orion Massive Star Forming Region: Implications for the Origin of Homochirality in the Solar System. *Orig. Life Evol. Biosph.*, V. 40, pp. 335-346.
- Gies D.R. and Helsel J.W.* (2005) Ice-age Epochs and the Sun's Path through the Galaxy. *Astrophys. J.*, V. 626, pp. 844-848.
- Gehrels N., Laird C.M., Jackman C.H., Cannizzo J.K., Mattson B.J., and Chen W.* (2003) Ozone depletion from nearby supernovae, *Astrophys. J.*, V. 585, pp. 1169-1176.
- Jackman C.H., Fleming E.L., and Vitt F.M.* (2000) Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere, *J. Geophys. Res.*, V. 105, pp. 11659-11670.
- Klussmann M., Iwamura H., Mathew S.P., Wells D.H., Pandya U., Armstrong A., Blackmond D.G.* (2006) Thermodynamic control of asymmetric amplification in amino acid catalysis. *Nature*, V. 441, pp. 621-623.
- Melott A.L.; Lieberman, B.S.; Laird, C.M.; Martin, L.D.; Medvedev, M.V.; Thomas, B.C.; Cannizzo, J.K.; Gehrels, N.; Jackman, C.H.* (2004) Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?, *Int. J. Astrobiol.*, V. 3, pp. 55–61.
- Modica P., Meinert C., de Marcellus P., Nahon L., Meierhenrich U.J., Le Sergeant d'Hendecourt L.* (2014) Enantiomeric Excesses Induced in Amino Acids by Ultraviolet Circularly Polarized Light Irradiation of Extraterrestrial Ice Analogs: A Possible Source of Asymmetry for Prebiotic Chemistry. *The Astrophys. J.*, V. 788, article id. 79, 11 pp.
- Pavlov A.A., Toon O.B., Pavlov A.K., Bally J., and Pollard D.* (2005b). Passing through a Giant Molecular Cloud – "Snowball" Glaciations produced by interstellar dust. *Geophysical Research Letters*, V. 32, ID L03705.
- Pavlov A.A., Toon O.B., Pavlov A.K., Bally J., and Pollard D.* (2005a) Catastrophic ozone loss during passage of the Solar system through an interstellar cloud. *Geophysical Research Letters*, V. 32, id. L01815, 4 pp.
- Prinn R. Fegley B.* (1987) Bolide impacts, acid rain, and biospheric traumas at the Cretaceous/Tertiary boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, V. 83, pp. 1-15.
- Shaviv N.J.* (2003) Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic Rays, and Ice Age Epochs on Earth. *New Astronomy*, V. 8, pp. 39-77.
- Talbot R.J., Newman M.J.* (1977) Encounters between stars and dense interstellar clouds, *Astrophys. J. Suppl.*, V. 34, pp. 295-308.

Wyman, K., Redfield, S. (2013) Probing Our Heliospheric History. I. High-resolution Observations of Na I and Ca II along the Solar Historical Trajectory. *Astrophys. J.*, V. 773, A96 (27 pp.).

*Chapter 1*

**IMPACT OF THE INTERSTELLAR MEDIUM  
ON PROCESSES ON EARTH**

© **N.G. Bochkarev**

*Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia*

The paper discusses possible impacts of the interstellar matter (ISM) on processes on Earth, first of all those, which may affect the Earth biosphere. ISM parameters, determining the degree of penetration of galactic cosmic rays, interstellar atoms and ions into the Solar system and their impact on Earth varies considerably as the Sun moves through different ISM regions. In some cases the impact may provoke severe environment changes substantial for the life on Earth.

## **Глава 2**

# **ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА РАННЕЙ СТАДИИ ДО ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

**© В.А. Батурин, А.В. Орешина, С.В. Аюков, А.Б. Горшков**

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия*

Мы рассматриваем основные концепции структуры и эволюции звезд, используя наше Солнце и его возможную предысторию в фокусе внимания. Солнце выбрано потому, что оно является звездой с хорошо изученной внутренней структурой, умеренной массой, в среднем возрасте ее жизни на Основной последовательности (MS). Особое внимание уделяется квазистационарной эволюции перед Главной Последовательностью. По сравнению с MS эта ранняя предварительная основная стадия (pMS) характеризуется более быстрым изменением параметров структуры и более высокой светимости, а также доминирующей ролью гравитационных источников энергии по отношению к ядерным. За короткое время, около 50 млн лет, звезда претерпевает некоторые изменения в своей структуре: от полностью конвективного до гибридного конвективно-радиационного и, наконец, к радиационно-доминированной, почти неподвижной звезде в MS.

Одним из главных вопросов эволюции звезд является то, что внутренняя структура зависит от предшествующих состояний и если в более поздние времена существуют некоторые следы ранней эволюции. Можно предположить существование следов в поверхностном содержании лития, а также в некотором накоплении тяжелых элементов в ядре, которое происходит во время ПМС. Предыдущая структура или эволюция звезды или ее изменение массы не оставляют следов во внутренней структуре современного Солнца.

## **Введение**

Звёзды рождаются в процессе гравитационного сжатия облаков пыли и газа. На самой начальной стадии вещество практически свободно падает в сторону центра конденсации, а прообраз будущей звезды неотделим от газо-пылевого диска. Мы не рассматриваем самую раннюю эволюцию прото-звёзд, а начинаем с состояния, когда внутри звезды устанавливается гравитационно-гидростатическое равновесие, и звезда приобретает хотя бы формально выделенную границу с определёнными радиусом и светимостью.

На ранней стадии излучаемая звездой энергия обеспечивается за счёт уменьшения гравитационной энергии в процессе сжатия. Гравитационная энергия частью идёт на нагревание в данном месте, а частью переходит в поток энергии, распространяющийся внутри звезды от более горячих центральных областей к наружным, более холодным, и в конечном итоге излучающийся в окружающее пространство. Процесс теплового переноса сохраняется на протяжении почти всей жизни звезды, то есть звезда почти всегда продолжает сжиматься в центре, одновременно нагреваясь.

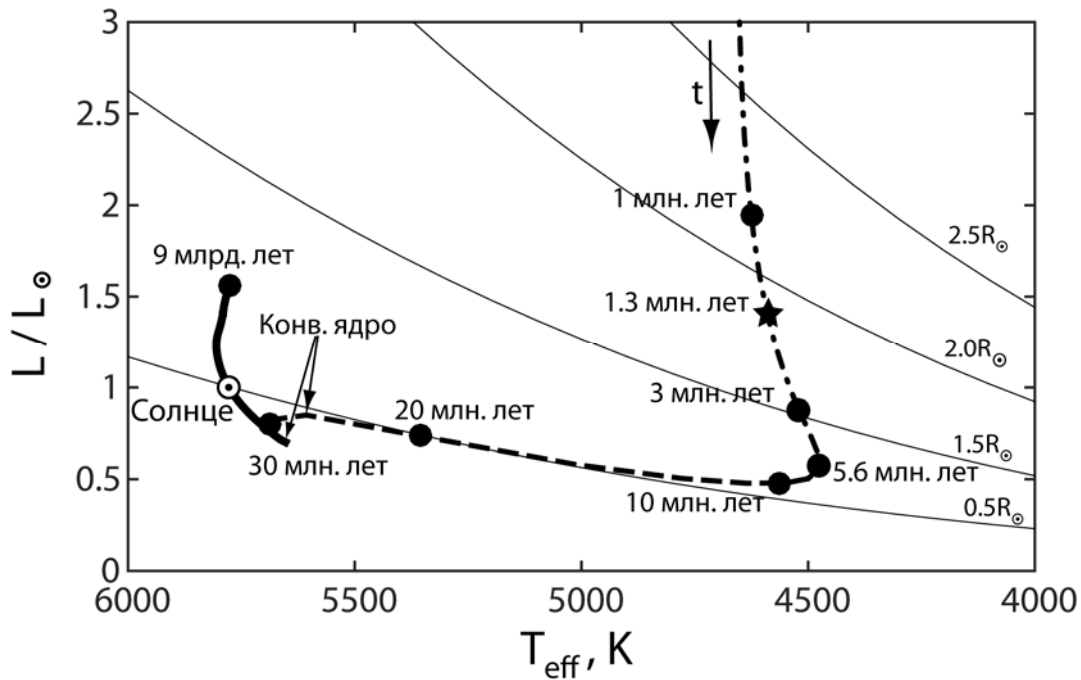
Примерно через 50 млн. лет после рождения звезды температура в центре достигает значений, при которых происходит смена источника энергии светимости. Внутри звезды начинают идти ядерные реакции превращения водорода в гелий, которые резко замедляют скорость сжатия в звезде и вытесняют гравитационное сжатие как источник светимости. Начинается жизнь звезды на Главной последовательности (ГП). После выхода на стадию ГП звезда проводит в псевдо-стационарном состоянии около 9 млрд. лет, до тех пор, пока весь водород в центре не превратится в гелий. Возраст нашего Солнца 4.6 млрд. лет, то есть оно может быть названо звездой среднего возраста.

Между ранней стадией эволюции и стадией ГП можно выделить ряд существенных отличий. Параметры звезды со временем на стадиях до ГП меняются в тысячи раз *быстрее*, чем на стадии ГП; все стадии до ГП в сто-двести раз короче времени жизни звезды на ГП. На ранней стадии гравитационная энергия в сравнимых долях тратится на увеличение внутренней энергии (нагрев вещества) и на вклад в поток светимости, в то время как ядерная энергия звезды на ГП *целиком* относится к потоку светимости, и её выделение не даёт вклад во внутреннюю энергию. Распределение источников потока светимости внутри молодой звезды значительно более равномерное по радиусу, чем в звёздах на ГП, когда они сильно сконцентрированы к центру. На стадии до ГП звезда в центре холоднее звезды на ГП, а на поверхности молодые звезды существенно «краснее», то есть имеют меньшую эффективную температуру. Важным отличием является также то, что в молодых звёздах нет химической эволюции главных компонентов – водорода и гелия. Химическая эволюция является главной причиной изменения звезды на ГП.

Данная статья посвящена исключительно ранней эволюции до начала ГП. Эволюция на ГП будет рассмотрена в нашей следующей статье в этом же сборнике [1]. Детальное обсуждение вопросов эволюции звёзд может быть найдено, например, в книгах [2–5].

### **1. Основные стадии эволюции звезды с массой Солнца на диаграмме Герцшпрунга-Рессела**

Для характеристики звёзд и их эволюции принято использовать светимость  $L$  и эффективную температуру  $T_{eff}$  как определяемые наблюдательные параметры. В этих переменных, называемых диаграммой Герцшпрунга-Рессела, эволюция параметров звезды с массой Солнца показана на рис. 1. Исторически принято увеличивать температуру на этой диаграмме справа налево. Светимость указана в единицах светимости современного Солнца  $L_{Sun} = 3.844 \times 10^{33}$  эрг/с [6]. Моделирование всех треков эволюции в данной работе выполнено с помощью программного кода CESAM2k [7].



**Рис. 1.** Эволюционный трек звезды с массой Солнца на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Штрих-пунктирная линия – стадия Хаяши, штриховая – стадия Хэньи, жирная сплошная – стадия главной последовательности. Тонкие линии соответствуют постоянным радиусам. Звёздочка обозначает момент образования лучистого ядра.

В начале эволюции трек звезды солнечной массы представляет собой почти вертикальную линию на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (рис. 1). Это общее сжатие полностью конвективной звезды называется стадией Хаяши (Hayashi). Полностью конвективная звезда сжимается во всех её частях, светимость падает, а эффективная температура остаётся примерно постоянной, 4600 К. Полностью конвективные звёзды обладают двумя особенностями. Во-первых, все такие звёзды устроены гомологически подобным образом, причём параметром подобия при равной массе звёзд выступает радиус. Во-вторых, в любой точке конвективной звезды выполняется политропное соотношение, что делает всю звезду весьма чувствительной к изменениям внешних условий.

В такой звезде выделение энергии в каждой точке оказывается пропорциональным поверхностной светимости. Тем самым, любое изменение светимости на поверхности немедленно сказывается на выделении энергии по всей звезде, включая светимость в центральной области. В полностью конвективной звезде её светимость и скорость эволюции определяются условиями в самых внешних слоях.

После примерно 1.3 млн. лет в центре конвективной звезды появляется лучистое ядро. Сам момент образования лучистого ядра никак не проявляется на наблюдаемых параметрах звезды и на её треке на диаграмме

Герцшпрунга-Рессела. Однако светимость звезды и её эффективная температура являются важными показателями для этого момента.

После своего появления, лучистое ядро растёт в размерах, одновременно вбирая в себя все большую массу и увеличивая светимость на границе. Конвективная оболочка сжимается и становится тоньше. Этот процесс происходит до достижения следующей критической точки – минимума светимости. Минимум светимости достигается примерно за 5.6 млн. лет, после чего радиус звезды перестаёт уменьшаться и сохраняется почти неизменным, лучистое ядро практически также больше не растёт, а эволюционный трек круто меняет своё направление. Эффективная температура звезды увеличивается до значений примерно 5700 К, а светимость – до величин начальной ГП. Это стадия Хеньи (Henyeu), показанная на рис. 1 штриховой линией. По прошествии 50 млн. лет наступает стадия ГП, которая длится около 9 млрд. лет (показана толстой сплошной линией).

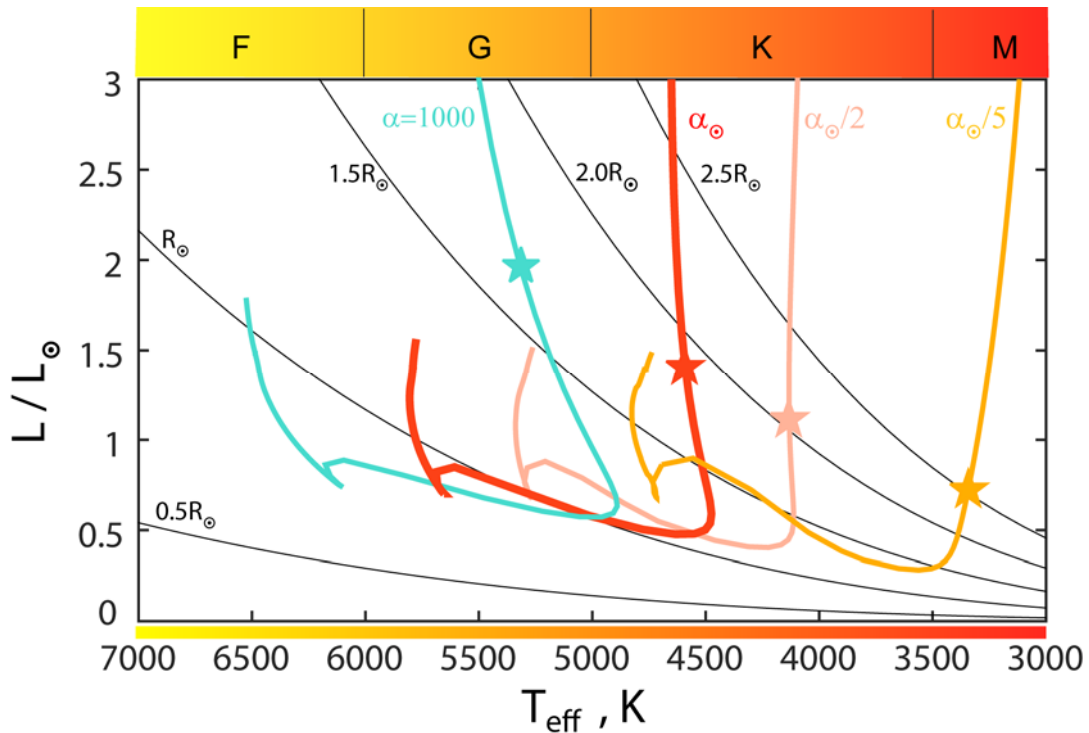
## **2. Роль конвективного переноса во внешних слоях**

При моделировании конвективных оболочек звёзд существует свободный параметр, описывающий эффективность переноса энергии в околоповерхностных слоях с низкой плотностью, которые можно назвать областью конвективно-лучистого переноса. В этих слоях под фотосферой энергия переносится одновременно и конвективным, и лучистым образом, причём соотношение между потоками меняется в значительных пределах и весьма сложно для моделирования. Для построения модели требуется ввести средний параметр, связывающий поток светимости через такой поверхностный слой и общий скачок энтропии между фотосферой и глубокими частями конвективной зоны. Принято использовать параметр конвективной эффективности  $\alpha$ . Его значение можно определить для модели Солнца, полагая, что мы знаем строение современного солнечного ядра и современный радиус. Использование той же величины  $\alpha$  для звёзд другой массы и возраста, химического состава, и тем более находящихся на ранних стадиях до ГП, является произвольным, хотя практически неизбежным, допущением.

В нашей работе мы рассмотрим эволюцию звёзд как с солнечным значением  $\alpha = \alpha_{Sun}$ , так и с другими меньшими ( $\alpha_{Sun}/2$ ,  $\alpha_{Sun}/5$ ), или заметно большими параметрами конвективной эффективности ( $\alpha = 1000$ ). Эволюционные треки в этих случаях представлены на рис. 2. Уменьшение эффективности конвекции приводит, прежде всего, к уменьшению общей светимости, а так же к увеличению радиуса звезды, при одновременном красном сдвиге её положения на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. В таких красных и «тусклых» звёздах, лучистое ядро образуется при меньших светимостях и больших радиусах – то есть при меньших температурах в центре (подробнее см. раздел 3). Минимальная светимость для таких звёзд тоже

уменьшается, и поворот трека в сторону ГП происходит при меньших эффективных температурах.

Если сохранить параметр постоянным в течение эволюции, то положение ГП окажется смещённым в красную сторону. Для достижения правильного положения участка ГП нужно вернуть  $\alpha$  к солнечному значению. Нет особых оснований полагать, что конвективная эффективность не может меняться во время переходной стадии или стадии Хеньи.



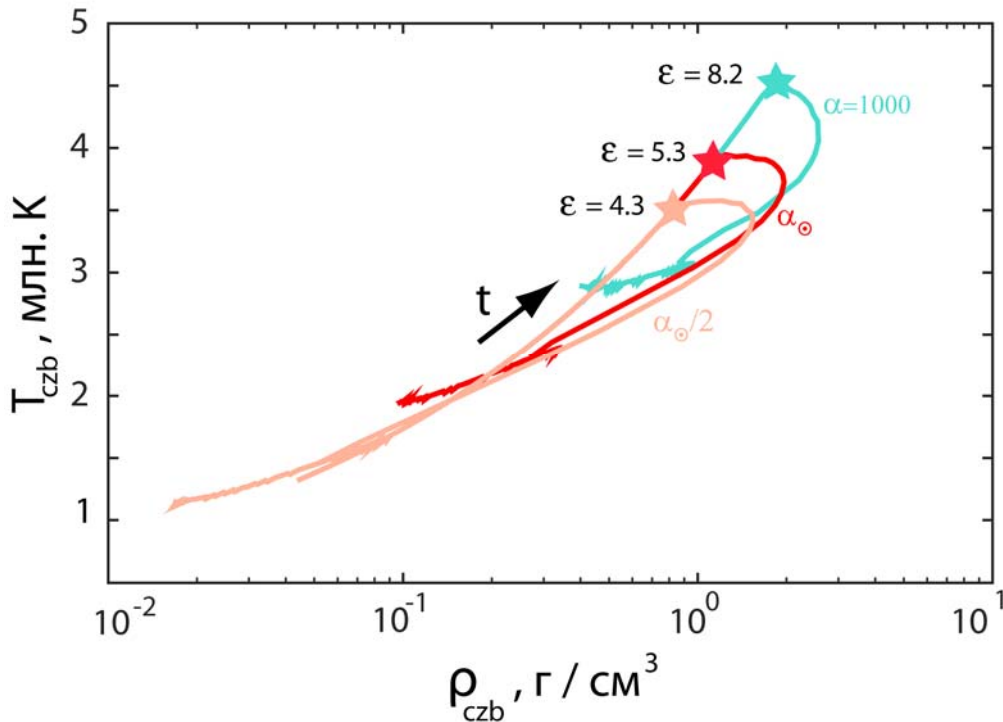
**Рис. 2.** Эволюционные треки звезд с массой Солнца и с разной эффективностью конвекции. Звёздочками обозначены моменты образования лучистого ядра. Верхняя шкала показывает спектральные классы звезд.

### 3. Условия образования лучистого ядра

В начале, на стадии Хаяши, звезда полностью конвективна. По мере сжатия температура в центре повышается, и в некоторый момент плазма становится прозрачной, образуется лучистое ядро. Со временем оно увеличивается, а конвективная зона отступает к поверхностным слоям. На рис. 3 показано, как меняются температура и плотность на дне конвективной зоны с течением времени. Стрелка указывает направление эволюции. Сначала, когда звезда полностью конвективна, дно конвективной зоны формально совпадает с центром звезды. Температура и плотность в центре возрастают по мере сжатия звезды, причём зависимость  $T_c(\rho_c)$  на этапе конвективного сжатия одинакова во всех моделях с разной эффективностью конвекции. Однако лучистое ядро образуется при разных температурах, указанных на графике звёздочками. После образования лучистого ядра, граница конвективной зоны перемещается во внешние слои, температура и

плотность в её основании уменьшаются, на графике получается характерная петля.

Условия образования лучистого ядра зависят от общей светимости звезды и от скорости выделения энергии в центре: чем она выше, тем больше температура и плотность нужны для образования лучистого ядра (рис.3).

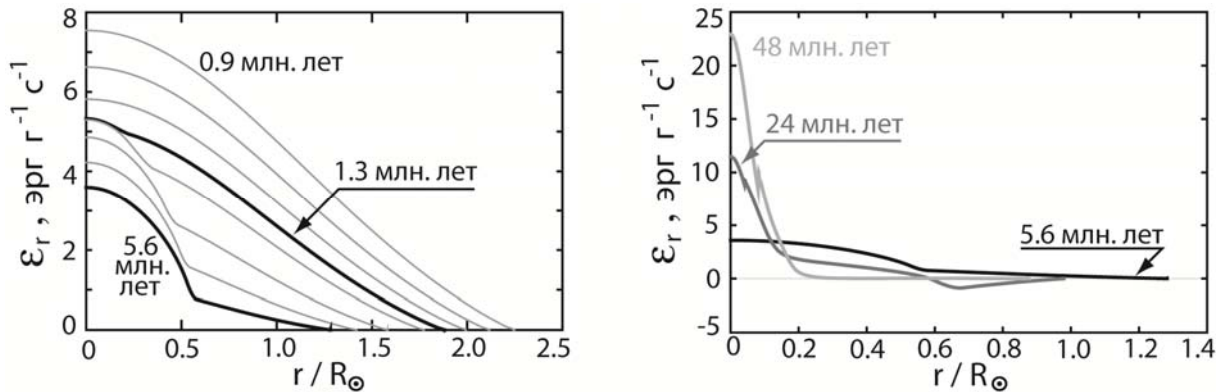


**Рис. 3.** Изменение температуры  $T_{czb}$  и плотности  $\rho_{czb}$  на дне конвективной зоны с течением времени. Разными цветами показаны модели с разной эффективностью конвекции. Звёздочками указаны моменты образования лучистого ядра. Рядом указана мощность энерговыделения в центре звезды ( $\varepsilon$ , эрг  $\text{г}^{-1}\text{с}^{-1}$ ).

Это объясняется тем, что переход от конвективного переноса энергии к лучистому в ядре, согласно критерию Шварцшильда [2], происходит тогда, когда произведение удельной мощности энерговыделения  $\varepsilon$  и непрозрачности плазмы  $\kappa$  превысит некоторую критическую величину. В свою очередь, энерговыделение в центре тем мощнее, чем выше светимость звезды и соответственно эффективнее конвективный перенос в оболочке звезды. Поэтому критическое значение произведения  $\varepsilon\kappa$  в центре звезды с большей светимостью достигается при меньшей непрозрачности, что соответствует более высокой температуре.

После образования лучистого ядра звезда попадает на конечную часть вертикального участка трека стадии Хаяши на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, на котором её внутреннее строение меняется кардинально. В процессе продолжающегося сжатия в звезде растёт лучистое ядро, которое достигает некоторого предельного размера, и тогда звезда перестает сжиматься и достигает минимальной светимости. Конвективная оболочка

сжимается, увеличивая плотность при сохранении температуры на дне и уменьшая энтропию внутри.



**Рис. 4.** Распределение удельного энерговыделения по радиусу звезды в последовательные моменты времени на стадии Хаяши (левая панель) и стадии Хеньи (правая панель). Излом на кривых соответствует границе между лучистым ядром и конвективной зоной.

Хотя светимость падает, энерговыделение в лучистом центре перестаёт падать так же быстро, как это было при конвективном ядре. Это связано с тем, что в лучистом ядре выделение гравитационной энергии подчиняется другим законам. На рис. 4, где показаны профили удельного энерговыделения  $\epsilon_r(r)$  для последовательных моментов времени. Вклад лучистого ядра в общую светимость звезды становится все больше. Доля светимости конвективной оболочки, наоборот, уменьшается, стремясь к нулевому значению. Радиус лучистого ядра в это время становится равен примерно половине радиуса звезды (рис. 4, кривая 5.6 млн. лет). Общая светимость звезды определяется практически только лучистым ядром и достигает минимального значения. На этом стадия Хаяши заканчивается, и звезда переходит на стадию Хеньи.

#### 4. Стадия Хеньи. Начальное конвективное ядро

На этом этапе энерговыделение в лучистом ядре растёт, в то время как вклад конвективной оболочки в светимость в целом близок к нулю, как и на последующей стадии ГП (рис. 4).

Эволюция на этой стадии проходит при практически неизменном радиусе звезды. Конец стадии Хеньи связан с началом ядерных реакций в центре, включая pp-реакцию, а также реакцию горения углерода  $^{12}\text{C}$  в реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ . В последней реакции начальное количество  $^{12}\text{C}$  в ядре практически полностью переходит в азот, после чего данная реакция прекращается. Однако её результатом является появление на некоторое время в центре звезды конвективного ядра. Максимальный размер конвективного ядра не превосходит 9% радиуса Солнца. По мере выгорания углерода, к 70 млн. лет, ядро снова приходит в лучистое равновесие.

Основная роль включающихся ядерных реакций pp-цепочки состоит в торможении эволюции звезды. Появляется дополнительный источник светимости в виде ядерных реакций, сжатие прекращается, и гравитационный вклад исчезает, звезда несколько уменьшает свою светимость (эффект «отрицательной теплоемкости») и радиус, перестраивается в оболочке, выходя в точку начальной ГП.

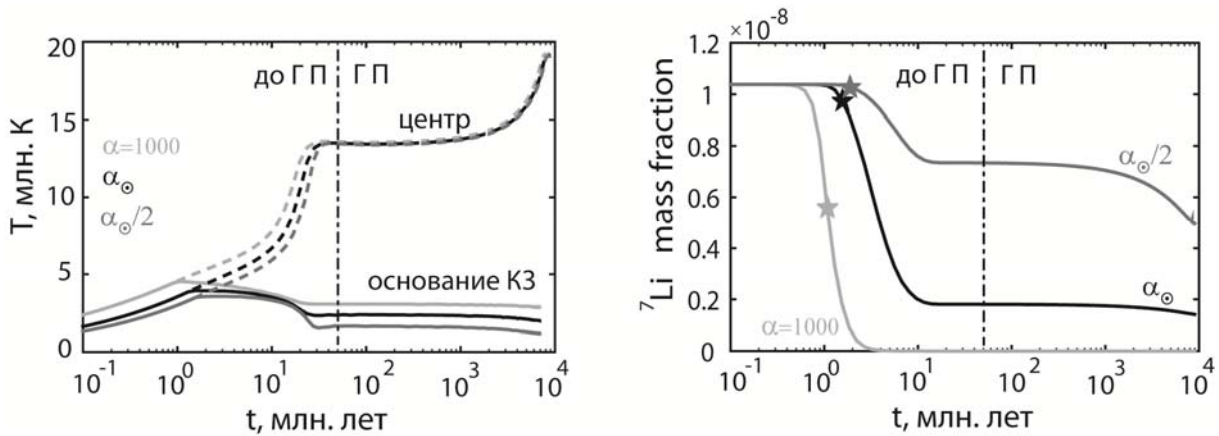
### **5. Ядерные реакции. Литий как след ранней эволюции**

На раннем этапе эволюции, по мере возрастания температуры, в недрах звезды начинают идти ядерные реакции. Первым вступает в реакцию дейтерий; соединяясь с протоном, он образует изотоп гелия, при этом испускается  $\gamma$ -квант:  $D(p, \gamma)^3\text{He}$ . Дейтериевая вспышка происходит при возрасте звезды порядка 10-30 тыс. лет, когда температура в центре становится выше 700 тыс. К. Примерно в 750 тыс. лет, при температуре 3.2 млн. К начинает гореть  ${}^6\text{Li}$  в реакции  ${}^6\text{Li}(p, \alpha)^3\text{He}$ . Далее, в 1 млн. лет, при  $T \approx 3.6$  млн. К загорается  ${}^7\text{Li}$  в реакции  ${}^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ . В конце стадии Хенни, в 20 млн. лет, при  $T \approx 10$  млн. К загорается углерод:  ${}^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ . Выделяющаяся в этих реакциях энергия достаточно мала и не оказывает заметного влияния на структуру звезды. Исключение составляет реакция горения углерода, о которой упоминалось в предыдущем разделе, приводящая к временному формированию небольшого конвективного ядра и накоплению в нём некоторого избытка изотопа  ${}^{14}\text{N}$ .

Заметим, что дейтерий и  ${}^6\text{Li}$  выгорают на стадии, когда звезда полностью конвективна. Перемешивание приводит к тому, что, хотя реакции горения идут в центральных областях звезды, уменьшение обилия данного элемента происходит по всему радиусу, в том числе и во внешних слоях. Напротив,  ${}^{12}\text{C}$  начинает гореть значительно позже, когда лучистое ядро занимает большую часть звезды, а перемешивание происходит только во внешних слоях. Поэтому выгорание углерода происходит только в центре звезды и никак не сказывается на его фотосферном обилии, остающемся неизменным.

Особое место занимает  ${}^7\text{Li}$ . Время его интенсивного горения приходится как раз на момент образования лучистого ядра, когда температура в центре достигает примерно 4 млн. К (рис. 5). Поэтому фотосферное обилие лития весьма чувствительно к физическим условиям, главным образом к температуре, на дне конвективной зоны именно в это время. Чем выше температура, тем больше лития выгорает. В дальнейшем, когда конвективная зона поднимается к поверхности и температура в её основании понижается примерно до 2 млн. К, горение лития в ней прекращается. Таким образом, фотосферное обилие лития «запоминает» момент образования лучистого ядра. Заметим, что на ГП обилие лития в КЗ может уменьшаться

вследствие диффузии, причём этот эффект более ярко выражен в тонких конвективных оболочках (кривая  $\alpha = \alpha_{Sun} / 2$  на рис. 5).



**Рис. 5.** Изменение температуры (левая панель) и содержания лития в фотосфере (правая панель) в моделях с разной эффективностью конвекции. Звёздочками отмечен момент образования лучистого ядра. Вертикальная штрих-пунктирная линия разделяет стадию до главной последовательности и стадию главной последовательности.

К 50 млн. лет становится значимым горение водорода с образованием дейтерия. Этот момент является началом нового этапа в эволюции звезды — стадии главной последовательности.

## 6. Заключение

Звезда «не помнит» своей истории и предыдущих состояний. Чем более ранняя стадия эволюции, тем легче происходит «забывание». На стадии конвективного сжатия эволюционный трек может быть достаточно сложным. Модель современного Солнца оказывается одинаковой вне зависимости от ранней эволюции.

В звёздах существует лишь «химическая память», то есть в содержаниях или в профилях отдельных компонент. На стадии ГП химическая память по водороду определяет строение звезды. До ГП химическая память проявляется в отдельных малых компонентах, преимущественно сохраняя или нет начальные содержания во внешних слоях.

Физические условия в момент образования лучистого ядра играют главную роль в эволюции внешнего содержания  ${}^7\text{Li}$  к началу главной последовательности. Содержание  ${}^7\text{Li}$  может служить индикатором процессов ранней эволюции.

Теоретически возможно обнаружение следов раннего конвективного ядра перед стадией ГП.

## Благодарность

Мы выражаем искреннюю признательность нашим коллегам из Обсерватории Лазурного Берега (Франция) Пьеру Морелю, Фредерику Теве-

нэну, Жанин Прово и Бернару Пишону за предоставленную возможность проведения расчётов с помощью кода CESAM2k.

### Литература

1. Аюков С.В., Батурин В.А., Горшков А.Б., Орешина А.В. // Этот сборник.
2. Шварцшильд М. Строение и эволюция звёзд, Москва: Едиториал УРСС, 2004.
3. Iben I., Jr. Stellar Evolution Physics. I. Physical Processes in Stellar Interiors, New York: Cambridge University Press, 2013.
4. Iben I., Jr. Stellar Evolution Physics. II. Advanced Evolution of Single Stars, New York: Cambridge University Press, 2013.
5. Kippenhahn R., Weigert A., Weiss A. Stellar Structure and Evolution, Astronomy and Astrophysics Library, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
6. Bahcall J.N. and Pinsonneault M.H. // Rev. Mod. Phys., 67:781, 1995.
7. Morel P. and Lebreton Y. // Astrophysics and Space Science, V.316, P. 61, 2008.

### Chapter 1

## EVOLUTION OF THE SUN AND PHYSICAL PROCESSES AT THE EARLY STAGE BEFORE MAIN SEQUENCE

© V.A. Baturin, A.V. Oreshina, S.V. Ayukov, A.B. Gorshkov

*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia*

We consider basic conceptions about structure and evolution of stars, using our Sun and its possible pre-history in the focus of attention. The Sun is chosen because it is a star with well-studied internal structure, moderate mass, at the middle-age of its life on the Main Sequence (MS). Special attention is given to quasi-stationary evolution before Main Sequence. In comparison with MS, this early pre-Main Sequence (pMS) stage is characterized by faster change of structure parameters and higher luminosity, as well as by dominant role of gravitational sources of energy with respect to nuclear ones. During short time, about 50 Myr, a star undergoes some transformations of its structure: from fully convective to hybrid convective-radiative and finally to radiative-dominated, almost stationary star at the MS.

One of the main questions of stellar evolution is if internal structure depends on previous states and if some traces of early evolution exist in later times. One can assume an existence of traces in the surface lithium abundance as well as in some accumulation of heavy elements in the core which occurs during pMS. Previous structure or evolution of a star or its mass change do not leave traces in the internal structure of the present-date Sun.

*Глава 3*

**ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ И ВСПЫШКИ  
МОЛОДЫХ ЗВЕЗД НА РАННЕЙ СТАДИИ ИХ ЭВОЛЮЦИИ**

© **В.Н. Снытников, О.П. Стояновская**

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Проведено численное моделирование аккреции газа из массивного диска на молодую звезду – раннее Солнце. Показано, что массивные самогравитирующие сгущения (клампы), сталкивая газ на протозвезду, могут вызвать эпизодические вспышки ее светимости. Сами клампы при этом на звезду не падают. Позднее из клампов могут сформироваться газовые гиганты или планеты земной группы. Тем самым, вспышки светимости могут быть прямо связаны с образованием планет в диске.

Солнце зародилось в молекулярном облаке в гравитационном коллапсе вещества. Раннее Солнце менялось со временем, как и другие подобные звезды. Так, на начальном этапе формируется протозвезда вместе со своим околозвездным диском за 100–200 тысяч лет. Далее протозвезда поглощает (аккрецирует) вещество из своего диска. Приток вещества из аккреционного диска на протозвезду может кратковременно изменяться на несколько порядков, давая эпизодическое изменение темпа аккреции. Характерные времена эпизодической аккреции составляют десятки и сотни лет. При этом не исключаются и времена, меньшие десятка лет. По одной из гипотез изменение темпов аккреции связывается со столь же быстрым изменением светимости у самых молодых звезд [1]. Изменение светимости этих звезд на временах десятка(ов) лет обнаруживается наблюдательными методами. Это явление зафиксировано для более чем 30 звезд-фуоров [2]. Для звезд солнечной массы эпизодическая аккреция может иметь место в первый миллион лет своей эволюции. За этот период времени мощные вспышки протозвезды приводят к кратковременным увеличениям поглощаемой световой энергии в аккреционном диске. Как следствие, его температура может периодически изменяться, оказывая влияние на многие динамические процессы в диске.

Динамические процессы в аккреционных дисках молодых звезд активно исследуются в теоретических моделях, объясняющих вспышки светимости. В сценарии гравитационной фрагментации диска [3] вспышки светимости появляются в результате падения на протозвезду массивных самогравитирующих сгущений, которые образуются во внешних частях массивных дисков, а после мигрируют внутрь к звезде из-за потери своего углового момента при гравитационном взаимодействии со спиральными ветвями плотности и с другими фрагментами. Однако эти сгущения могут и не упасть на звезду. Из них могут формироваться газовые гиганты, а в случае аккумулялирования пыли из диска и потери сгустками газа могут по-

лучиться планеты земной группы. Сценарий формирования разного типа планет из самогравитирующих сгущений называется гипотезой приливного измельчения и разрабатывается в статьях [4, 5] и других работах. Здесь мы хотим продемонстрировать, что происходит со светимостью звезды, если сгущения (клампы) не падают на звезду.

### Модель газового околозвездного диска

Вычислительные эксперименты, представленные в данной работе, были проведены в рамках модели тонкого диска. Это означает, что мы пренебрегли вертикальным движением среды и рассмотрели динамику диска, где вся его масса сосредоточена в экваториальной плоскости системы.

Так как мы не предполагаем изучать тепловую динамику фрагментов, мы рассчитываем охлаждение с помощью простого предположения об уравнении состояния. Мы использовали адиабатическое приближение. Рост энтропии в газе при прохождении ударных волн игнорируется (такой подход используется, например, в [6]). Более подробную информацию о процессах охлаждения в моделях дисков можно найти в [7].

Система уравнений гравитационной газовой динамики для околозвездного диска представляет собой уравнения Эйлера, дополненные гравитационной силой и уравнением Пуассона для гравитационного потенциала среды с газом. Подробное описание модели приведено в [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\Sigma \vec{v}) &= 0, \\ \Sigma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \Sigma (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} &= -\vec{\nabla} p^* + \Sigma \vec{g}, \\ \frac{\partial S^*}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) S^* &= 0, \\ \vec{g} &= -\nabla \Phi, \quad p^* = T^* \Sigma, \quad S^* = \ln \frac{T^*}{\Sigma^{\gamma^*-1}}, \quad \gamma^* = 3 - \frac{2}{\gamma} \\ \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2, \quad \Delta \Phi_2 = 4\pi G \Sigma. \end{aligned}$$

Здесь  $\vec{v}$  – скорость газа в плоскости диска,  $p^*$  – интеграл от давления газа по высоте диска (поверхностное давление газа),  $\gamma^*$  – эффективный показатель политропы для квазитрехмерного случая,  $\gamma$  – показатель политропы,  $S^*, T^*$  – величины, аналогичные температуре и энтропии газа,  $\Phi$  – потенциал диска, представляющий собой сумму потенциала центрального тела  $\Phi_1$  и собственного потенциала диска  $\Phi_2$ , определяемого из решения уравнения Пуассона.

Мы моделировали динамику диска протяженностью от 10 до 100 АЕ. Расчетная область имеет размер  $400 \times 400$  АЕ<sup>2</sup>, то есть в 2 раза больший, чем начальный диаметр диска. В начальный момент времени задавалась

внешняя и внутренняя границы диска, его масса (по которой определялась поверхностная плотность), а также масса центрального тела. Рассматривались диски с массой от  $0.1M_{\odot}$  до  $0.25M_{\odot}$  вокруг центрального тела массы  $0.8M_{\odot}$ , где  $M_{\odot}$  – масса Солнца. Поверхностная плотность была обратно пропорциональна радиальной координате. Начальная температура задавалась обратно пропорциональной квадратному корню радиальной координаты. Она была равна 90 К на радиусе 10 АЕ и 30 К на радиусе 100 АЕ. Начальное распределение плотности и температуры диска воспроизводит результаты численного моделирования коллапса молекулярного облака [9]. Радиальная скорость газа задавалась равной нулю, а угловая скорость таким образом, чтобы обеспечить равновесную начальную конфигурацию, то есть так, чтобы центробежная, центростремительная силы и градиент давления уравновешивали друг друга:

$$\frac{v_{\varphi}^2}{r} = \frac{1}{\Sigma} \frac{\partial p^*}{\partial r} + \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad v_r = 0.$$

### Гравитационная неустойчивость в газе тонкого околозвездного диска

Дисперсионное соотношение для рассматриваемой модели тонкого газового диска выводится в ряде работ, к примеру, [10]:

$$(\omega - m\Omega)^2 = c_s^2 k^2 + \kappa^2 - 2\pi G \Sigma |k|, \quad \kappa^2 = 4\Omega^2 + r \frac{\partial \Omega^2}{\partial r},$$

где  $\kappa$  – эпициклическая частота,  $m$  – число спиральных рукавов в диске,  $\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$  – угловая частота вращения,  $c_s$  – скорость звука. Для кеплерового диска  $\kappa = \Omega$ . Если правая часть соотношения оказывается меньше нуля, то в диске возникают экспоненциально нарастающие в линейном приближении возмущения и создаются условия для развития неустойчивости.

Если диск не вращается, то  $\Omega = 0$  и  $\kappa = 0$ , тогда  $\omega^2 = c_s^2 k^2 - 2\pi G \Sigma |k|$ . Из этого соотношения получается критическая длина Джинса  $\lambda_J$  для тонкого диска, которая характеризует минимальный размер возмущения в среде плотности  $\Sigma$ , которое будет нарастать под действием собственного гравитационного поля:

$$k_J = \frac{2\pi}{\lambda_J} = \frac{2\pi G \Sigma}{c_s^2}, \quad \lambda_J = \frac{c_s^2}{G \Sigma}.$$

Для вращающегося диска без спиралей  $m = 0$  следует локальное условие Тоомре маргинальной устойчивости из уравнений  $\frac{d\omega^2}{dk} = 0$ ,  $\omega^2 = 0$ :

$$k_T = \frac{\pi G \Sigma}{c_s^2}, \quad \lambda_T = \frac{2\pi}{k_T} = 2\lambda_J.$$

Путем подстановки найденного значения  $k_T$  в  $\omega^2 = 0$  мы получаем критическое значение Тоомре параметра  $Q = \frac{\Omega c_s}{\pi G \Sigma} = 1$ . Для  $Q > 1$  – тонкий диск стабилен относительно роста радиальных возмущений. На радиусах с  $Q < 1$  диск неустойчив к нарастанию радиальных флуктуаций.

Развитие в локальной области Джинсовской неустойчивости может начать сжимать в ней газ. Область гравитирующего газа с характерным размером  $\lambda > \lambda_J$  собирается и концентрирует свою массу  $M_J$  в меньшем объеме. В случае тонкого диска  $M_J \sim \pi \lambda_J^2 \Sigma$ . При уменьшении  $\lambda$  общая энергия остается постоянной. Но тепловая энергия при этом растет, а гравитационная отрицательная энергия  $U \sim -\frac{M_J^2}{\lambda}$  – падает. Если термодинамические свойства среды таковы, что показатель адиабаты  $\gamma < \frac{4}{3}$ , то силы давления не могут остановить гравитационного сжатия. Возникает гравитационный коллапс вещества, при котором  $\lambda$  стремится к нулю относительно начальных масштабов. При наличии вращения, при несимметричности растущего возмущения относительно максимума плотности и в ряде других случаев коллапс в точку не происходит, а возникают более сложные течения газа. В плоскости диска такие области с развитием гравитационных коллапсов выглядят как возникновение значений плотности, на несколько порядков превышающих средние значения в близкой окрестности. Такие области называются фрагментами или клампами, и представляют собой гравитационно связанные сгустки газа.

### **Численный метод и программа**

Разработанный численный метод решения газодинамической системы уравнений общего вида основан на методе дробных шагов с расщеплением по физическим процессам, подробное описание которого приведено в [11]. Система уравнений Эйлера для тонкого диска решается в лагранжевых переменных SPH-частиц [12]. Каждая частица имеет свое компактное ядро. Она взаимодействует с ближайшими другими частицами на определенном, в общем случае, переменном радиусе. В разностные уравнения дополнительно вводится искусственная вязкость, чтобы предотвратить при сверхзвуковых скоростях нефизическое проникновение частиц между собой. Из-за этого в модели для SPH-частиц появляется сила трения. Каждая SPH-частица несет определенную массу. Чтобы найти гравитационную силу, действующую на каждую из частиц с этой массой, вводится сетка в декартовых координатах. На эту сетку проводится линейная интерполяция плотности газа. Тем самым, происходит усреднение мелкомасштабных флуктуаций плотности по ближайшему сеточному окружению и короткодействию-

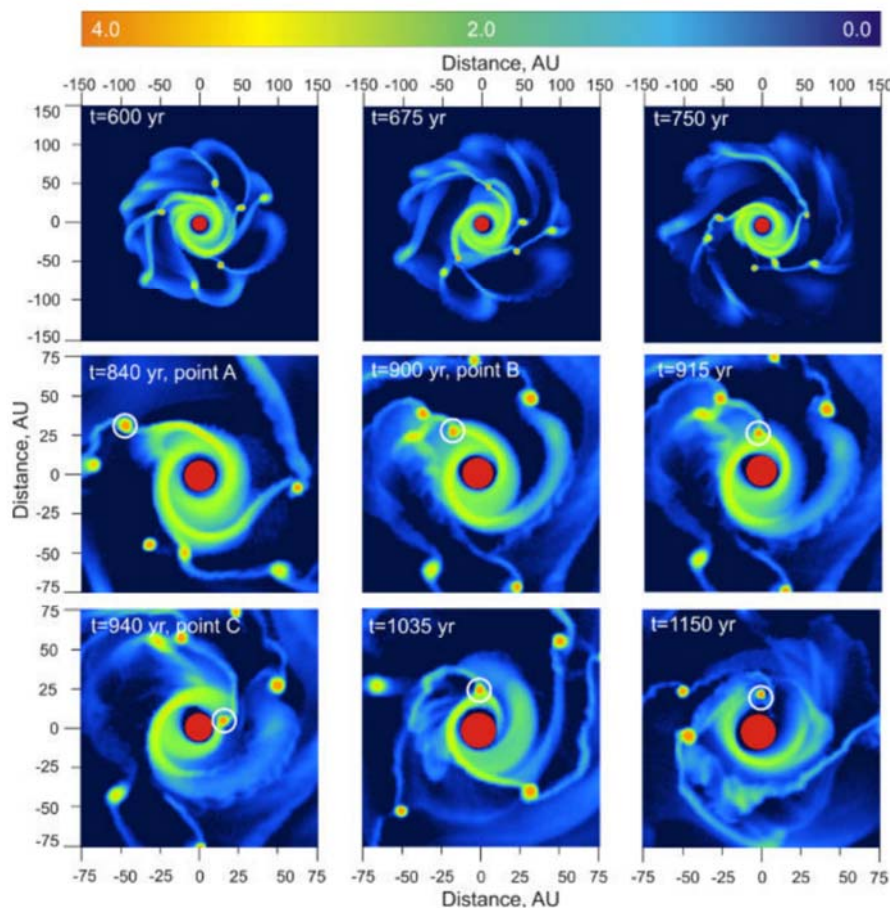
ющих сил частица–частица. Далее на сетке находится гравитационное поле через решение уравнения Пуассона. Для вычисления гравитационного потенциала используется параллельный метод "свёртки" решения уравнения Пуассона на декартовой сетке. Система уравнений газовой динамики и уравнение для потенциала диска  $\Phi_2$  решаются на каждом временном шаге. SPH-частица считается упавшей на центральное тело, если она подлетает ближе, чем расстояние  $R_{\text{cell}}$ . При этом она передает протозвезде свою массу. Для расчетной области  $400 \times 400 \text{ AE}^2$  во избежание использования слишком мелких шагов по времени в расчетах далее было задано  $R_{\text{cell}} = 10 \text{ AE}$ . Другие параметры численной модели, если это не оговаривается дополнительно, 160000 SPH-частиц,  $1024 \times 1024$  ячеек сетки, шаг по времени  $\tau = 0.03$  года.

### ***Результаты вычислительных экспериментов***

На рис. 1 приведены девять распределений логарифма поверхностной плотности в плоскости диска для моментов времени от 600 лет до 1150 лет. Эти распределения получены для массивного диска с массой  $0.25M_{\odot}$ . В последовательности верхних трех графиков масштаб длины в 2 раза отличается от масштаба длины у нижних шести графиков. На рис. 2 приведена скорость аккреции массы на центральную звезду для этого расчета (самая верхняя зависимость). Как хорошо видно из первого распределения плотности газа в диске к моменту времени 600 лет сформировалось до семи клампов (сгустков) газа в спиральной структуре рукавов. Сжатие вещества в этих клампах ограничено размером ячейки для расчета потенциала. Вихревая структура клампов рассматривалась нами ранее в работе [13]. Локальная структура динамики газа в клампе меняется со временем. Начало появления клампов связано с развитием неустойчивостей. Из них, в первую очередь, это легко определяемая неустойчивость Джинса формирования клампов в спиральных рукавах, если для этого в диске складываются условия.

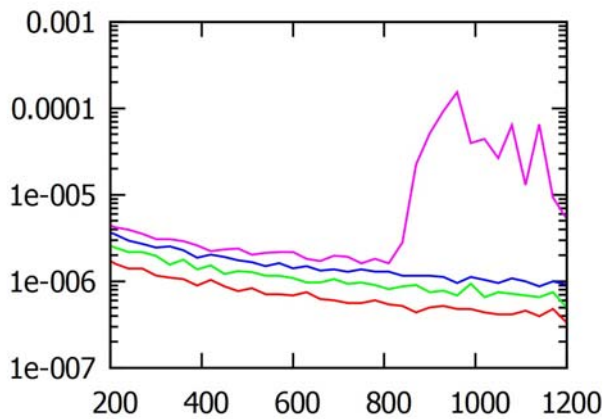
Сформировавшиеся к моменту времени 600 лет клампы двигаются вокруг протозвезды, взаимодействуют с окружающим газом и друг с другом, а также приближаются к протозвезде. При этом до момента времени 800 лет темп аккреции газа на протозвезду плавно уменьшается. Однако на момент времени 830–840 лет темп аккреции газа на протозвезду взрывным образом начинает нарастать. Как следует из распределения поверхностной плотности, для момента 840 лет клампы все еще находятся на большом удалении от протозвезды. Поэтому нарастание темпа аккреции в этом расчете связано не с падением отдельного клампа, а с падением окружающего протозвезду газа. Гравитационное воздействие клампов на газ при их расположении в пространстве привело к изменению момента импульса у газа и увеличило его радиальную скорость. Это позволило газу попасть на про-

тозвезду. Временная зависимость темпа аккреции на протозвезду с большим разрешением по времени и от 500 лет до 1400 лет приведена на рис. 3. На этом графике также нанесена зависимость удаления клампа от протозвезды, взятого в кружок на рис. 1, от времени. Как хорошо видно из этих зависимостей, кламп сначала обращается вокруг центра почти по круговой траектории с радиусом примерно 55 АЕ на временах от 600 до 800 лет. Далее кламп переходит в режим миграции к центру. Эта миграция заняла у него 100–150 лет, а далее кламп перешел на эллиптическую орбиту с перигелием 15 АЕ, апогеем около 30 АЕ и периодом примерно 120 лет. Период изменения темпа аккреции на протозвезду, оцениваемый из графика, находится между 55 и 70 годами, что примерно в 2 раза короче периода обращения клампа. Существование корреляции между высокоэллиптической орбитой одиночного клампа и аккрецией газа из диска на протозвезду требует дальнейшего исследования и своего объяснения, если это не случайное совмещение двух периодических процессов.

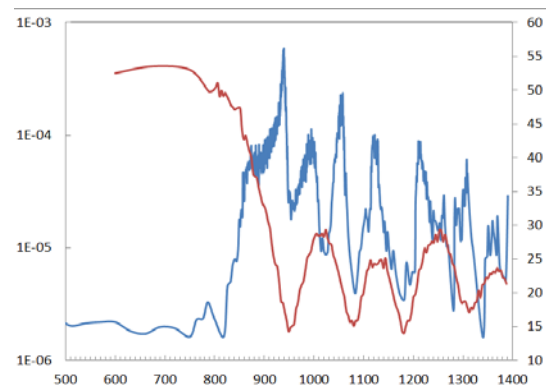


**Рис. 1.** Динамика отдельных сгущений (клампов) в массивном диске  $0.25 M_{\odot}$ . Логарифм поверхностной плотности газа. Красным цветом показано положение поглощающей ячейки. Вещество, попавшее в ячейку, считается поглощенным центральным телом.

Необходимо отметить, что формирование клампов в диске происходит в нашей модели только при достаточно больших массах диска. Как следует из графика рисунка 2, темп аккреции для масс диска от  $0.1M_{\odot}$  до  $0.2M_{\odot}$  является монотонно падающей зависимостью до 1200 лет. Для этих значений масс при вращении газа вокруг звезды диски остаются в устойчивом состоянии. В маломассивных дисках по нашим расчетам отсутствуют как локальные неустойчивости Джинса, так и радиальные неустойчивости Тумре. Наблюдаются лишь неярко выраженные спиральные волны плотности с  $m = 6-8$  рукавами, а частоты в дисперсионном соотношении имеют вещественные значения. Таким волнам плотности посвящено большое количество работ, ссылки на первые из которых можно найти, к примеру, в [10]. У газа в диске в основном имеется только круговая скорость движения вокруг звезды. Поэтому и отдельные SPH-частицы двигаются практически по круговым траекториям.

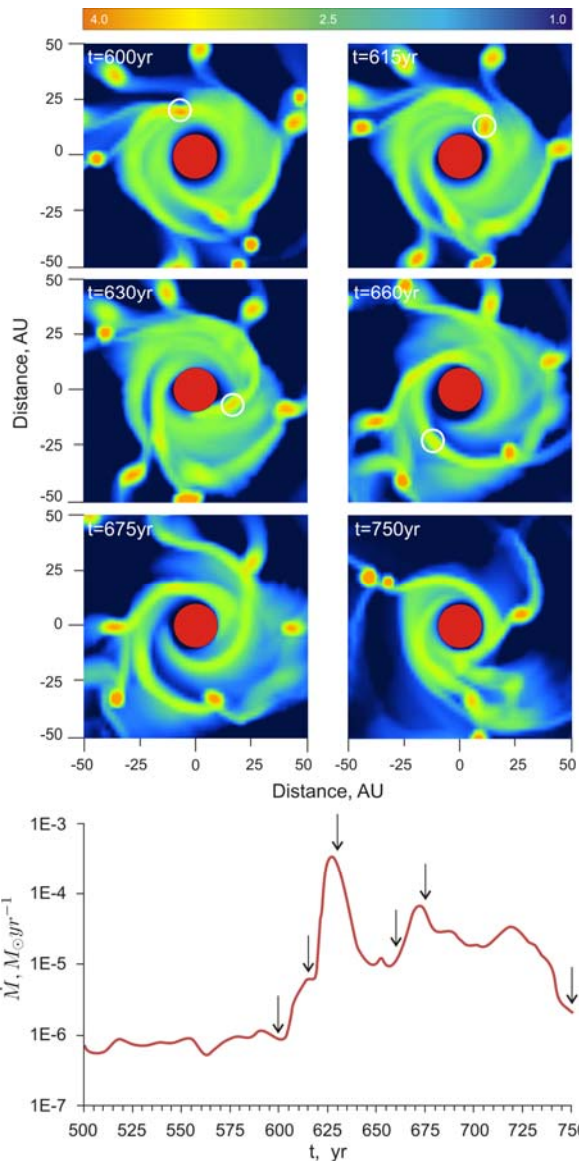


**Рис. 2.** Аккреция газа на звезду для четырех значений массы диска  $0.1$ ,  $0.15$ ,  $0.2$  и  $0.25M_{\odot}$  (снизу вверх). Зависимость темпа аккреции (производная по времени от массы центрального тела) от времени, полученная в расчете по модели тонкого диска.



**Рис. 3.** Эпизодическая аккреция газа на звезду. Темп аккреции и расстояние от клампа в кружке на рисунке 1 до протозвезды (правая ось ординат, АЕ) в зависимости от времени в годах. Масса диска  $0.25 M_{\odot}$ .

В массивном диске с  $0.25M_{\odot}$  сложная структура из рукавов и сгустков может возникать на более ранних моментах времени при внесении возмущений в начальные условия. Нами задавались начальные азимутальные скорости газа, отличающиеся от локальных равновесных скоростей на величину  $0.01$  азимутальной скорости. Результаты моделирования для шести моментов времени приведены на рисунке 4 для диска массы  $0.25M_{\odot}$ . Расчеты проделаны на более подробной сетке  $2048 \times 2048$  ячеек с числом SPH-частиц 600000, увеличенным относительно расчетов рис. 1–3. Шаг по времени  $\tau = 0.01$  года. Хорошо видно, что к моменту времени 600 лет



**Рис. 4.** Эпизодическая аккреция газа на звезду с возмущенными начальными условиями. Темп аккреции в зависимости от времени в годах и логарифм поверхностной плотности для моментов времени, отмеченных стрелками. Кружком отмечено положение одного клампа. Масса диска  $0.25M_{\odot}$ .

клампы с высокими значениями плотности возникли в диске вокруг области диаметром примерно 50 АЕ. В этой области поверхностная плотность газа слабо меняется от радиуса, но в ней присутствует кламп, выделенный на рисунке кружком. С этого момента времени начинается быстрое увеличение темпа аккреции газа на протозвезду (рис. 4). Этот темп достигает своего максимума на время 630 лет, когда кламп подошел близко к поглощающей области. К этому моменту приливные силы фактически превратили кламп в сигарообразное возмущение плотности. Частицы из этого возмущения не попали на протозвезду, а продолжили свое движение в диске. К моменту времени 660 лет высота этого возмущения спадает относительно плотности газа в этой области диска. Сам диск под воздействием других клампов и в результате своих неустойчивостей стал нерегулярным. К моменту времени 675 лет в нем сформировались два спиральных рукава плотности, которые исчезли к моменту времени 750 лет. Среди частиц

много тех, которые ушли с круговых на более сложные и/или стохастические траектории в результате развития различных неустойчивостей.

### **Дискуссия и выводы**

Повышение темпа аккреции на несколько порядков величины, периодическое или нерегулярное, вызывает изменение светимости протозвезды. По-видимому, аналогичное изменение светимости испытывало и раннее Солнце. Очевидным следствием такого изменения светимости было значительное повышение температуры газа в диске за относительно короткие времена в ближней к протозвезде зоне. В диске возникают давления, скорости газа и другие величины с глобальным отклонением от равновесных распределений. Как мы продемонстрировали в расчете с возмущением азимутальной скорости, это может привести к более быстрому развитию неустойчивостей в диске с формированием клампов. В свою очередь попадание клампов в ближнюю к звезде зону приводит к увеличению темпов аккреции. Влияние увеличения температуры диска из-за увеличения светимости звезды начали изучать в работе [14]. Однако нет ясности о роли этой положительной обратной связи на эпизодическую аккрецию. Тем более, нет ясности и о влиянии этой связи на химические процессы в околозвездном диске раннего Солнца.

Таким образом, сценарий вспышек светимости протозвезды из-за падения на неё массивных самогравитирующих сгущений должен быть дополнен другим вариантом развития событий. В этом варианте после гравитационной фрагментации диска во внешних частях массивных дисков образуются клампы. Далее они мигрируют по диску к звезде из-за потери своего углового момента при гравитационном взаимодействии со спиральными ветвями плотности и с другими фрагментами. Эти сгущения, двигаясь по эллиптическим орбитам, сталкиваются газ на протозвезду, вызывая вспышки светимости. Сами клампы на звезду не падают. Из клампов позднее могут формироваться газовые гиганты или планеты земной группы, в частности, при аккумуляции пыли из диска и приливного измельчения.

Работа Стояновской О.П. поддержана грантом Президента РФ МК-5915.2016.1 и грантом РФФИ №16-07-00916.

### **Литература**

1. *Hartmann L.* Accretion Processes in Star Formation, 2009, Cambridge University Press.
2. *Audard M. et al.* Episodic Accretion in Young Stars, Protostar and Planets. 2014. 387–410.
3. *Vorobyov E., Basu S.* The Burst Mode of Protostellar Accretion, *ApJ*, 2006. Vol. 714. 133–138.
4. *Nayakshin S.* Grain sedimentation inside giant planet embryos, *MNRAS*, 2010. Vol. 408. 2381–2396.

5. *Boley A.C., Hayfield T., Mayer L., Durisen R.H.* Clumps in the outer disk by disk instability: Why they are initially gas giants and the legacy of disruption, *Icarus*, 2010. Vol. 207, 509–516.
6. *Pickett B.K., Cassen P., Durisen R.H., Link R.* The Effects of Thermal Energetics on Three-dimensional Hydrodynamic Instabilities in Massive Protostellar Disks, *ApJ*, 1998. Vol. 504, 468–491.
7. *Durisen R.H., Boss A.P., Mayer L., Nelson A.F., Quinn T., Rice W.K.M.* Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation. *Protostar and Planets*, 2007, 607–622.
8. *Stoyanovskaya O., Snytnikov N., Snytnikov V.* Modeling Circumstellar Disc Fragmentation and Episodic Protostellar Accretion, *Astronomy and Computing*, submitted.
9. *Vorobyov E.I.* Embedded Protostellar Disks Around (Sub-)Solar Protostars. I. Disk Structure and Evolution, *ApJ*, 2010. Vol. 723. 1294–1307.
10. *Рольфс К.* Лекции по теории волн плотности. – М.: Мир, 1980.
11. *Стойновская О.П., Снытников Н.В., Снытников В.Н.* Алгоритм для решения нестационарных задач гравитационной газовой динамики: комбинация метода SPH и сеточного метода вычисления гравитационного потенциала. *Вычислительные методы и программирование*. 2015. Т. 16. 52–60.
12. *Monaghan J.J.* Smoothed particle hydrodynamics. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 1992. Vol. 30. 543-574.
13. *Стойновская О.П., Снытников В.Н.* Численное моделирование образования уединенных вихрей повышенной плотности в околозвездном диске. *Вычислительные методы и программирование*, 2012. Т. 13. 377–383.
14. *Stamatellos D., Whitworth A.P. and Hubber D.A.* Episodic accretion, protostellar radiative feedback, and their role in low-mass star formation. *MNRAS*, 2012. Vol. 427, 1182–1193.

### *Chapter 3*

## **EPISODIC ACCRETION AND OUTBURSTS OF YOUNG STARS AT AN EARLY STAGE OF THEIR EVOLUTION**

© **V.N. Snytnikov, O.P. Stoyanovskaya**

*Novosibirsk State University,  
Novosibirsk, Russia*

We simulated the accretion of the gas from the massive disc to the young star – the early Sun. We found that self-gravitating clumps, pushing the gas onto the protostar, may cause episodic outbursts of its luminosity. Under some conditions such clumps are not destroyed and later can be transferred into the gas giant or terrestrial planet. Thus, the luminosity outbursts of the low-mass star can be directly related to the formation of planets in the disc.

## *Глава 4*

# **СВЕТИМОСТЬ СОЛНЦА НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАЦИИ**

© **С.В. Аюков, В.А. Батурин, А.Б. Горшков, А.В. Орешина**

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия*

Согласно современным представлениям, 4.6 млрд. лет назад, когда Солнце стало звездой Главной последовательности, светимость Солнца составляла примерно 70% от современной. Этот вывод базируется на предположении, что на стадии Главной последовательности светимость Солнца обеспечивается ядерными реакциями. Оценки показывают, что если принять альбедо и теплоизлучающую способность Земли неизменными в течение всего времени эволюции Солнца, то 2.3 млрд. лет назад океаны должны были замерзнуть. Это противоречит геологическим данным, согласно которым 3.6–3.8 млрд. лет назад на Земле была жидкая вода.

Данная проблема известна в литературе, в частности, под названием Faint Young Sun Paradox (проблема «тусклого молодого Солнца»). В работе рассмотрено изменение светимости в стандартной теории эволюции. Увеличение среднего молекулярного веса вещества звезды при превращении водорода в гелий вызывает плавный рост светимости звезды при нахождении на Главной последовательности. Также приведено несколько нестандартных моделей: полное перемешивание, приводящее к однородности по химическому составу; увеличение/уменьшение сечения  $p+p$  реакции в несколько раз. Наблюдательные данные по потокам солнечных нейтрино, однако, исключают большую часть нестандартных моделей.

## **Введение**

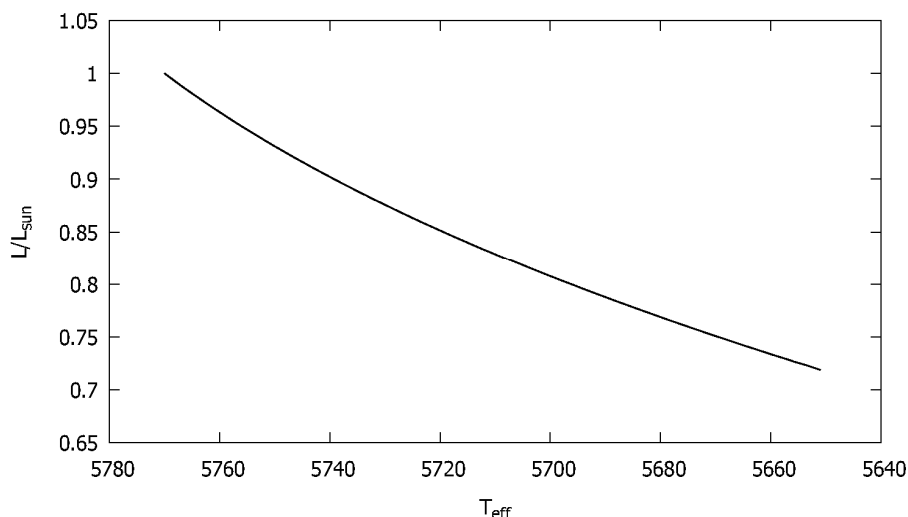
Светимость Солнца – полная мощность, излучаемая нашей звездой. Спутниковые болометрические измерения позволили измерить ее с хорошей точностью, в настоящий момент она равна  $3.844 \pm 0.001 \cdot 10^{33}$  эрг/сек [3]. Измерения показывают, что светимость, возможно, немного меняется с характерными временами в несколько лет [5]; в данной работе такие короткопериодические вариации не рассматриваются.

В процессе эволюции происходят два основных процесса, изменяющих химический состав внутри звезды. Это ядерные реакции и осаждение элементов. Во время пребывания на Главной последовательности на Солнце происходит только один тип термоядерных реакций – превращение водорода в гелий. В центральной части Солнца (примерно  $1/3$  радиуса) водород превращается в гелий; к настоящему времени в самом центре он «сгорел» примерно наполовину. Осаждение элементов, или диффузия, выражается в медленном опускании гелия и более тяжелых элементов к центру Солнца. Водород, соответственно, поднимается вверх, что приводит к обеднению топливом энерговыделяющего ядра. Эти изменения в химическом составе Солнца приводят к тому, что наша звезда медленно меняет

светимость и радиус со временем. Изменение светимости Солнца на стадии горения водорода в ядре является темой данной работы.

### Эволюция Солнца: стандартная модель

Современное понятие стандартной солнечной модели (ССМ) сформировалось в работах Джона Баколла ([2–3] и др.). Под ССМ понимается результат расчета эволюции звезды массой в одну солнечную, откалиброванный так, что при возрасте 4.6 млрд. лет светимость и радиус звезды равны современным солнечным. Калибровка осуществляется подгонкой двух свободных параметров: содержания гелия (которое из наблюдений не определяется) и параметра  $\alpha$  теории конвекции. Кроме того, стандартная модель опирается на набор существенных упрощений: полная сферическая симметрия задачи, отсутствие аккреции и потери массы, отсутствие перемешивания вне областей конвекции и др. Несмотря на эти упрощения, ССМ в целом весьма хорошо воспроизводит наблюдаемые свойства Солнца.



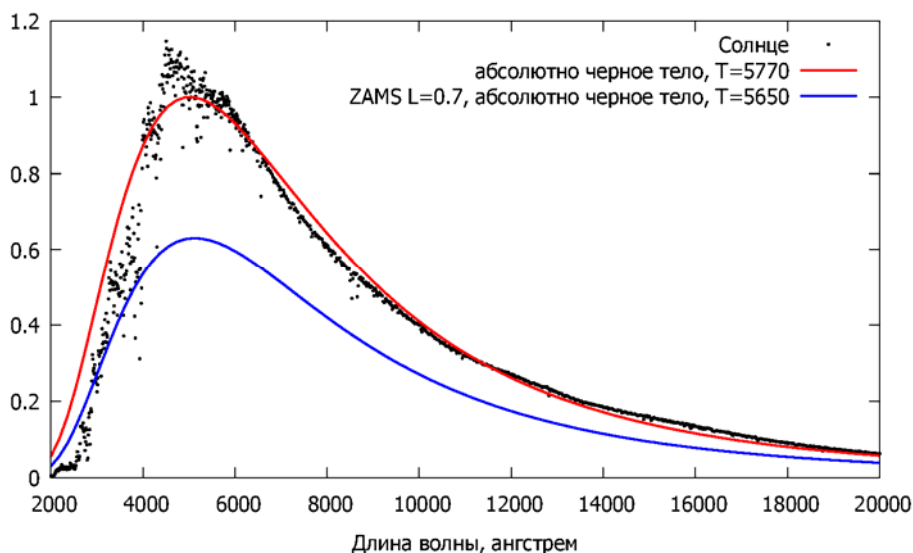
**Рис. 1.** Эволюционный трек стандартной модели Солнца на стадии Главной последовательности (движение по треку происходит справа налево).

Возраст Солнца определяется по возрасту старейшего метеоритного вещества [3] и равен примерно 4.6 млрд. лет. В данной работе принимается упрощенный подход: считается, что Солнце образовалось полностью однородным по химическому составу и в нем уже шли ядерные реакции. Такое “начальное Солнце” обычно называется моделью ZAMS (Zero-Age Main Sequence, Начальная Главная последовательность). В таком подходе эволюция Солнца – это эволюция от ZAMS до современного состояния.

Эволюционный трек Солнца на Главной последовательности на диаграмме светимость–эффективная температура выглядит как почти прямая линия (рис. 1). Светимость изменилась от примерно 0.7 до 1 за время эволюции, т.е. выросла примерно в 1.5 раза. Чтобы представить себе наглядно такое изменение, вспомним впечатления во время частной фазы солнечно-

го затмения. При фазе 0.7 потускнение солнечного света не бросается в глаза, но вполне заметно.

Эффективная температура за 4.6 млрд. лет незначительно выросла от 5650 до 5770К. 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 5650К (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 в красной области спектра, вызванное сдвигом температуры Солнца, гораздо меньше общего ослабления потока, вызванного уменьшением светимости.



**Рис. 2.** Спектральный состав излучения Солнца (точки) и абсолютно черного тела при эффективных температурах, соответствующих современному Солнцу и ZAMS. По вертикальной оси — поток излучения на земной орбите, нормированный так, что максимум потока для абсолютно черного тела равен 1.

Если эволюционный трек Солнца нанести на классическую диаграмму Герцшпрунга-Ресселла, то он будет выглядеть маленькой черточкой. Напомним, что звезды чрезвычайно сильно отличаются друг от друга по светимости, примерно на 10 порядков. Разброс по эффективным температурам не столь впечатляющий, но все же самые горячие звезды имеют эффективную температуру в 10 раз больше, чем самые холодные. Солнце же изменило эффективную температуру в течение эволюции всего на 2%.

Таким образом, светимость и эффективная температура Солнца во время пребывания на Главной последовательности изменились мало. Это общее свойство треков звезд малой массы во время пребывания на Главной последовательности — звезда в целом очень стабильна в течение длительного времени.

Сам рост светимости во время пребывания на Главной последовательности можно объяснить из общих представлений о строении и эволюции звезд (см., например, обзор [6] и ссылки в нем). 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.

### **Faint Young Sun Paradox (проблема «тусклого молодого Солнца»)**

Изменение светимости Солнца в процессе эволюции является ключевым моментом в проблеме, известной как Faint Young Sun Paradox, или «проблема тусклого молодого Солнца» [8]. Проблема заключается в том, что согласно современным представлениям (см. выше), 4.6 млрд. лет назад светимость Солнца составляла около 70% от сегодняшней. Запишем уравнение для теплового баланса Земли [8]:

$$\frac{1}{4} S (1-A) = e \sigma T^4,$$

здесь  $S$  – солнечная постоянная,  $A$  – альбедо Земли,  $e$  – излучательная способность Земли,  $T$  – температура поверхности Земли. Сейчас средняя температура поверхности Земли около 287К, или +14°C. Если принять альбедо и теплоизлучающую способность Земли неизменными в течение всего времени эволюции Земли, то получается зависимость температуры от светимости (выраженной в единицах современной):

$$T = 287 \sqrt[4]{L}.$$

Легко найти, что достаточно понизить светимость Солнца до 0.843 от современной, чтобы средняя температура поверхности Земли стала равной 271К (температура замерзания морской воды). Такая светимость достигается при возрасте 2.3 млрд. лет; это половина всего времени существования Земли в твердом состоянии. Таким образом, океаны должны были оттаять всего 2.3 млрд. лет назад, а до этого находиться в замерзшем состоянии. Это противоречит геологическим данным, согласно которым 3.6–3.8 млрд. лет назад на Земле была жидкая вода [10].

Решение Faint Young Sun Paradox пока не найдено. Рассматриваются несколько возможных путей решения. Первый состоит в том, что, возможно, светимость Солнца менялась в прошлом не так сильно, как мы думаем.

В рамках стандартной модели Солнца это невозможно. Интересной гипотезой представляется допущение значительной потери массы Солнцем в процессе эволюции. Более массивное Солнце было бы более ярким, и также Земля была бы ближе к нему. В работе [7] показано, что потери массы в 7% за время эволюции было бы достаточно, но пока нет никаких данных, которые бы подтверждали столь сильную потерю массы Солнцем.

Второй путь решения проблемы заключается в том, что наше предположение о неизменности теплоизлучающей способности Земли может быть ошибочным. В атмосфере Земли могли присутствовать газы, которые создавали бы значительно более сильный парниковый эффект, чем сейчас. Могли происходить и другие процессы, значительно изменяющие теплоизлучающую способность планеты, о которых мы можем только догадываться.

Рассматриваются и более экзотические гипотезы, например, медленное уменьшение гравитационной постоянной  $G$  со временем. Их обсуждение выходит за рамки данной работы.

В любом случае следует отметить, что если бы светимость Солнца изменилась за 4.6 млрд. лет в 100 или даже 10 раз, жизнь на Земле, скорее всего, не возникла бы из-за слишком быстрого изменения климатических условий и слишком короткого интервала времени, в течение которого на поверхности Земли вода находится в жидком состоянии. Человечеству остается лишь поблагодарить природу за то, что у карликовой звезды на Главной последовательности светимость меняется достаточно медленно!

### **Нестандартные модели Солнца**

Чтобы проиллюстрировать зависимость светимости от молекулярного веса, а также оценить, насколько сильно можно изменить ход эволюции звезды, были рассчитаны несколько нестандартных моделей звезд с массой, радиусом и светимостью, равными солнечным (табл. 1). В нестандартные модели здесь были внесены искусственные изменения в физику с целью проиллюстрировать общие принципы теории эволюции звезд. Все рассмотренные здесь нестандартные модели не похожи на Солнце по многим параметрам внутреннего строения.

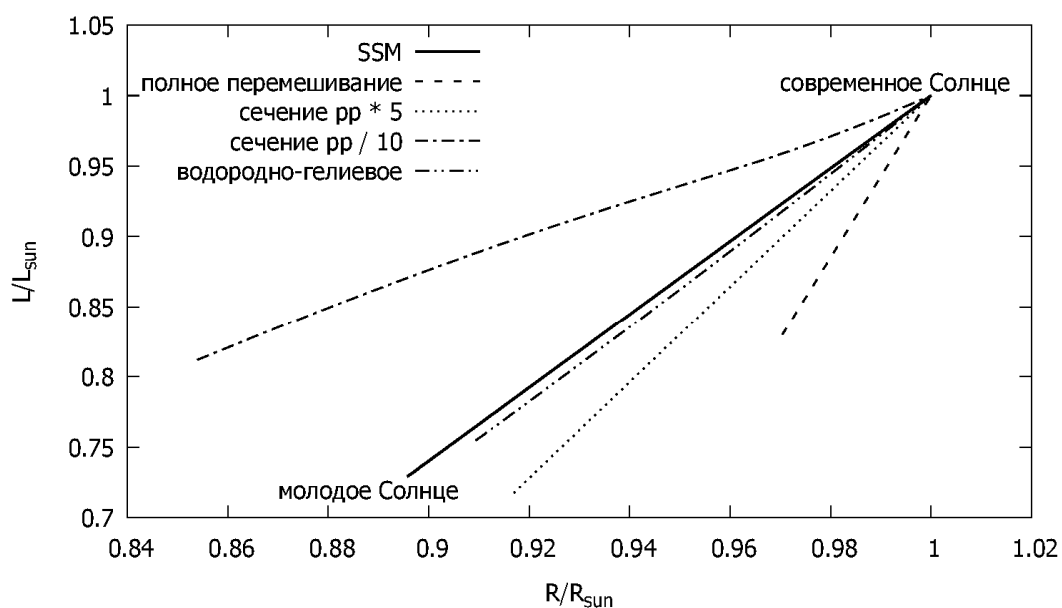
Рассмотрим сначала стандартную модель 771-0126 (на графиках ниже отмечена SSM). В центре Солнца сгорело примерно половина имевшегося там водорода. Температура в центре – 15.3 млн. К, плотность – 148 г/см<sup>3</sup>. Молекулярный вес в центре изменился с 0.569 до 0.762. Поток  $\nu\nu$  нейтрино хорошо согласуется с наблюдениями; предсказываемый поток борных нейтрино несколько меньше наблюдаемого, но разница незначительна.

Модель 771-0110 можно считать случаем, в котором молекулярный вес вещества в ядре меняется меньше всего. Эта модель рассчитана в предположении постоянного полного перемешивания вещества в течение эволюции. В этом случае образующийся в ядре Солнца гелий равномерно

распределяется по всей массе звезды, и молекулярный вес вещества в ядре меняется гораздо меньше по сравнению со случаем, когда образующийся гелий остается в ядре. Содержание водорода в центре модели 771-0110 составляет 0.684, и температура и плотность в ее центре также гораздо ниже, чем у стандартной модели. Эта модель имеет меньшую по сравнению со стандартной концентрацию массы к центру, что характерно для всех химически однородных моделей.

**Таблица 1.** Модели современного Солнца. Все модели рассчитаны с химическим составом, соответствующим [1]. Для простоты осаждение элементов не учитывалось. Модель 771-0126 – стандартная модель. Модель 771-0110 – однородная модель, имитирующая полностью перемешанную звезду. В моделях 771-0103 и 771-108 сечение реакции p+p увеличено в 5 раз (771-0103) и уменьшено в 10 раз (771-0108). Модель 771-0125 – почти водородно-гелиевая; в ней содержание тяжелых элементов  $Z=0.001$  (в стандартной модели  $Z = 0.013$ ).  $T_c$  и  $\rho_c$  – температура и плотность в центре модели в млн. К и  $г/см^3$  соответственно,  $P_c$  – давление в центре модели в  $10^{17}$  дин/см<sup>2</sup>,  $X_c$  – массовая доля водорода в центре,  $Y_s$  – содержание гелия на поверхности,  $R_{cz}/R$  – положение дна конвективной зоны. p+p и  $^8B$  – потоки нейтрино на орбите Земли, в  $1/(см^2 \cdot сек)$ . Все эти величины относятся к моделям современного Солнца.  $X_0$  – содержание водорода в модели ZAMS, т.е. 4.6 млрд. лет назад. В последней строке указаны наблюдаемые потоки нейтрино по [9].

Модель	$T_c$	$\rho_c$	$P_c$	$X_0$	$X_c$	$Y_s$	$R_{cz}/R$	p+p, $10^{10}$	$8B, 10^6$
771-0126	15.32	148.2	2.304	0.730	0.373	0.257	0.740	6.118	3.841
771-0110	14.32	90.6	1.732	0.714	0.684	0.303	0.810	6.388	0.755
771-0103	12.64	81.2	1.017	0.695	0.356	0.292	0.672	6.474	0.040
771-0108	20.01	498.1	6.361	0.762	0.003	0.223	0.863	2.438	93.380
771-0125	13.81	127.8	2.108	0.897	0.543	0.102	0.898	6.426	0.379
Borexino								$6.37 \pm 0.46$	$5.25 \pm 0.16$

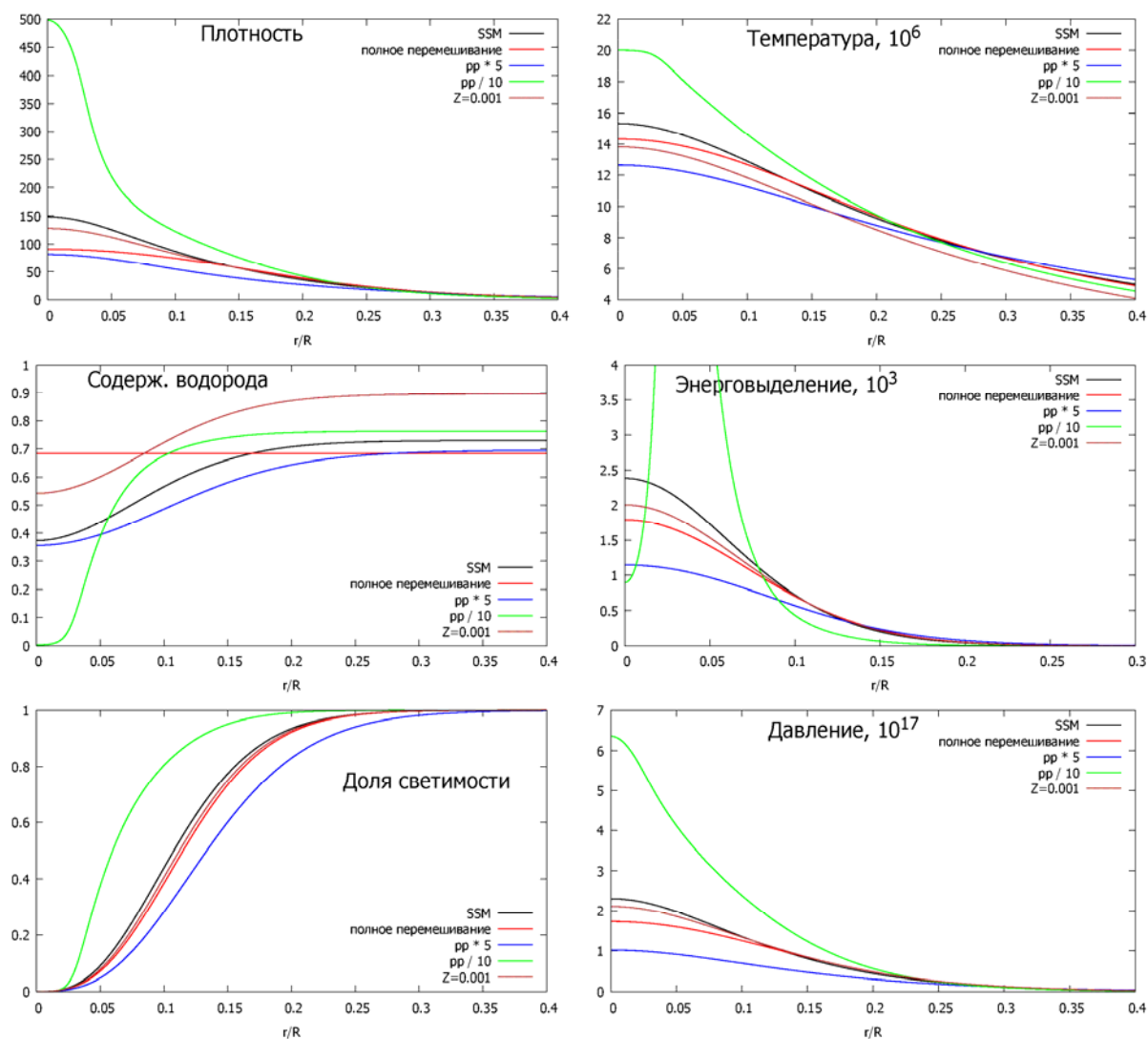


**Рис. 3.** Эволюционные треки стандартной и нестандартных моделей Солнца.

Эволюционный трек модели 771-0110 показывает, что изменение светимости в течение эволюции действительно значительно меньше по сравнению со стандартным случаем: модель имеет светимость 0.83 солнечных, т.е. в этом случае жидкая вода должна быть на Земле почти с момента ее образования. Модель, однако, имеет очень высокое содержание гелия во внешних слоях и очень мелкую конвективную зону, что не согласуется с гелиосейсмическими данными. Низкая температура в центре приводит к тому, что предсказываемый поток борных нейтрино в 7 раз меньше наблюдаемого. Кроме того, неизвестна причина, по которой Солнце могло бы полностью перемешиваться в течение всей эволюции.

Модель 771-0103 с увеличенным сечением pp реакции имеет еще более слабую концентрацию массы к центру, чем 771-0110. Повышенная эффективность выработки энергии привела к тому, что у этой звезды самое холодное и самое разреженное ядро; давление в центре вдвое ниже, чем в стандартной модели. Энерговыведение в центре на единицу объема у этой звезды также самое малое среди рассмотренных моделей. Звезда как бы сильно размазана, и даже относительно далекие от центра области дают существенный вклад в светимость. Ядро модели имеет настолько низкую температуру, что поток борных нейтрино от этой модели в 100 раз меньше наблюдаемого. Изменение светимости в ходе эволюции у этой модели примерно такое же, как у стандартной модели, и химический состав у нее также близок к стандартному.

Модель 771-0108 (сечение pp реакции уменьшено в 10 раз) является собой прямую противоположность рассмотренной выше. Концентрация массы к центру у нее велика на всех стадиях эволюции. Слабая эффективность pp цепочки привела к тому, что для поддержания баланса энергии ядру пришлось сильно сжаться и разогреться; в ZAMS модели этого трека центральная температура равна 17.5 млн. К. Светимость в модели ZAMS сравнительно велика (см. рис. 3) и выгорание водорода в центре шло очень быстро. В результате к возрасту в 4.6 млрд. лет водород в ядре почти полностью превратился в гелий. Основное выделение энергии идет на внешней границе ядра в слоевом источнике, причем значительную роль играет CNO цикл, что хорошо видно по потоку pp нейтрино от данной модели. График светимости показывает, что почти вся светимость выделяется в сравнительно малом объеме (слой от 0.03 до 0.15 радиуса). Выделение энергии на единицу объема в этом слое очень велико: максимум, не показанный на рис. 4, составляет 12000 эрг/(сек·см<sup>3</sup>). Чрезвычайно высокий поток борных нейтрино отражает высокую температуру слоя, в котором идут ядерные реакции. Из-за отсутствия источников энергии в ядре оно стало очень плотным (в 3.5 раза плотнее, чем в стандартной модели) и горячим (20 млн. К). Светимость в такой звезде на протяжении эволюции меняется медленнее, чем в стандартной модели, однако вряд ли такая модель может служить решением проблемы Faint Young Sun Paradox.



**Рис. 4.** Строение моделей Солнца. Слева сверху: плотность в  $г/см^3$ ; справа сверху: температура в млн. К; слева в середине: содержание (массовая доля) водорода; справа в середине: выделение энергии в единицу времени в единице объема,  $10^3$  эрг/(сек·см<sup>3</sup>); слева внизу: доля светимости, выделяющейся внутри сферы радиуса  $r$ ; справа внизу: давление,  $10^{17}$  дин/см<sup>2</sup>.

Последняя нестандартная модель, 771-0125, почти полностью состоит из гелия и водорода; более тяжелых элементов в ней всего 0.001 (по массе). Основная роль тяжелых элементов в звездах солнечного типа заключается в том, что они являются значительным источником непрозрачности вещества. Отсутствие в звезде тяжелых элементов не приводит к полной перестройке звезды. Центральная температура и плотность становятся несколько меньше, но в целом звезда достаточно близка к стандартной (рис. 4). В этой сравнительно «прозрачной» звезде конвективная зона очень мелкая. Основное отличие от стандартной модели состоит в том, что для обеспечения нужных светимости и радиуса при низких непрозрачностях требуется большое содержание водорода: гелия в этой звезде всего около 10%. Такая цифра не укладывается не только в погрешность гелиосейсмических опре-

делений содержания гелия, но и в погрешность спектральных наблюдений и представления об образовании нашей Вселенной.

### **Заключение**

В рамках современных представлений об эволюции звезд неизбежен рост светимости в процессе эволюции вследствие вызванного термоядерными реакциями изменения химического состава плазмы в ядре. Величина изменения светимости определяется достаточно хорошо, и изменить эволюцию так, чтобы обеспечить незамерзание океанов 3.8 млрд. лет назад, а тем более «теплую раннюю Землю» сложно даже в рамках нестандартных моделей. Рассмотренные в данной работе экзотические модели звезд, несмотря на значительные искусственные изменения в физике плазмы, не могут обеспечить нужный ход светимости со временем. Из других существующих нестандартных моделей следует отметить модели Солнца с потерей массы не менее 7% за время жизни; такие модели могут решить проблему «тусклого молодого Солнца». В целом же перспектива решения этого парадокса в рамках физики Земли выглядит более многообещающей.

### **Литература**

1. *M. Asplund, N. Grevesse, J. Sauval, and P. Scott.* Ann. Rev. Astron. Astrophys., 47:481, 2009.
2. *J.N. Bahcall, W.F. Huebner, S.H. Lubow, P.D. Parker, and R.K. Ulrich.* Reviews of Modern Physics, 54:767-799, 1982.
3. *J.N. Bahcall and M.H. Pinsonneault.* Rev. Mod. Phys., 67:781, 1995.
4. *J.N. Bahcall, M.H. Pinsonneault, and S. Basu.* Astrophys. J., 555:990-1012, 2001.
5. *Y. Calisesi, R.-M. Bonnet, L. Gray, J. Langen, and M. Lockwood.* Solar Variability and Planetary Climates. 2007.
6. *D.O. Gough.* Space Sci. Rev., 196:15-47, 2015.
7. *I.J. Sackmann and A.I. Boothroyd.* Astrophys. J., 583:1024-1039, 2003.
8. *C. Sagan and G. Mullen.* Science, 177:52-56, 1972.
9. *O Smirnov, G Bellini, J Benziger et al.* Physics of Particles and Nuclei, 46:166-173, 2015.
10. *J.W. Valley, W.H. Peck, E.M. King, and S.A. Wilde.* Geology, 30(4):351-345, 2002.

## **Chapter 4**

### **SOLAR LUMINOSITY ON THE MAIN SEQUENCE. STANDARD MODEL AND VARIATIONS**

© **S.V. Ayukov, V.A. Baturin, A.B. Gorshkov, A.V. Oreshina**  
*Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia*

Our Sun became Main Sequence star 4.6 Gyr ago according Standard Solar Model. At that time solar luminosity was 30% lower than current value. This conclusion is based on assumption that Sun is fueled by thermonuclear reac-

tions. If Earth's albedo and emissivity in infrared are unchanged during Earth history, 2.3 Gyr ago oceans had to be frozen. This contradicts to geological data: there was liquid water 3.6–3.8 Gyr ago on Earth.

This problem is known as Faint Young Sun Paradox. We analyze luminosity change in standard solar evolution theory. Increase of mean molecular weight in the central part of the Sun due to conversion of hydrogen to helium leads to gradual increase of luminosity with time on the Main Sequence. We also consider several exotic models: fully mixed Sun; drastic change of pp reaction rate; Sun consisting of hydrogen and helium only. Solar neutrino observations however exclude most non-standard solar models.

## Глава 5

## АКТИВНОСТЬ САМОГО РАННЕГО СОЛНЦА

© М.М. Кацова<sup>1</sup>, М.А. Лившиц<sup>2</sup>, Т.В. Мишенина<sup>3</sup>, Б.А. Низамов<sup>1,4</sup><sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троцк, Россия<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория, Одесский национальный университет,  
Одесса, Украина<sup>4</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

Анализ мягкого рентгеновского G-звёзд показывает, что самые молодые, быстро вращающиеся звёзды характеризуются насыщением активности, но, уже начиная с периодов вращения 1.4 дня, часть звёзд демонстрирует активность солнечного типа. Такой тип активности, уровень которой определяется скоростью осевого вращения, включает в себя формирование пятен, вспышки и т.п., сначала нерегулярен, и только затем появляются условия для формирования циклов. Данные КА *Kepler* отчётливо показывают, что звёзды одного и того же спектрального типа демонстрируют два уровня активности. Эта бимодальность различных распределений звёзд, изменение характера циклов и уровня вспышечной активности свидетельствуют об эволюции активности с возрастом. По характеру активности условно назовём G-карлики с периодами вращения от 1 до 5–6 дней термином *the Baby Sun* (с максимальным количеством таких звёзд с  $P_{\text{rot}} = 3$  дня), а G-звёзды с  $P_{\text{rot}}$  от 10 до 18 дней – *the Young Sun*. Возраст основной массы *the Baby Sun* составляет примерно 200–600 млн лет, *the Young Sun* – 1–2 млрд лет. Для *the Baby Sun* характерно повышенное содержание лития. Мы оцениваем уровень квазистационарного рентгеновского и коротковолнового излучения внешней атмосферы *the Baby Sun*. По данным GALEX получено, что для этих звёзд поток излучения в области FUV 1350–1750 Å, приведённый к одной астрономической единице, составляет  $12.8 \pm 4.2$  эрг/(см<sup>2</sup> с), что более, чем в 6 раз превосходит поток от современного Солнца. Из данных КА *Kepler* следует, что супервспышки чаще происходят именно на *the Baby Sun*. Наша оценка показывает, что гигантские вспышки с полной энергией  $10^{35}$  эрг могут происходить на *the Baby Sun* примерно один раз в год.

## 1. Введение

Активность самого молодого Солнца можно представить, изучая другие маломассивные звёзды поздних спектральных классов. Ранее мы подробно исследовали этот вопрос применительно к Солнцу в эпоху формирования регулярной циклической активности в возрасте около 1 млрд лет. Обнаружение множества экзопланет – планет вокруг других звёзд – и обсуждение проблем возникновения жизни стимулировали начало изучения характеристик излучения и потоков частиц, которые могут существовать на молодых звёздах, начиная со времени прихода на главную последовательность до эпохи формирования цикла. В это время окончание гравитационного сжатия протопланетного облака сопровождается быстрым вра-

щением протозвезды солнечной массы с периодами около 1 дня [Messina et al., 2011]. При этом обычные самые молодые звёзды с околозвёздными дисками типа Т Тау превращаются в объекты типа post-T Тау, у которых ещё сохраняются остатки пылевого облака. Свидетельства присутствия пыли слабо проявляются даже у звёзд в эпоху формирования планет, например у звезды HD 220476 (NX Aqr, G5 V) с периодом вращения 7 дней.

Сейчас разработана возможность оценки возраста F, G, K звёзд на основе нескольких подходов. Детальное изучение рассеянных звёздных скоплений показало, что большинство звёзд каждого из них вращаются с периодами, соответствующими их возрасту. Продолжающееся там звёздообразование приводит к тому, что в каждом скоплении существует определённая доля более быстро вращающихся звёзд, которая заметно уменьшается с возрастом скопления в целом [Barnes et al., 2016]. С другой стороны, изучение различных индексов активности показало, что основным фактором, определяющим уровень активности, является осевое вращение звёзд. Одновременный учёт результатов изучения рассеянных скоплений и активности стал основой метода оценки возраста по периоду вращения звёзд – гирохронологии. Это позволяет построить диаграмму уровней активности хромосферы и короны, что позволяет понять эволюцию активности с возрастом.

## **2. Этапы эволюции активности: *the Baby Sun***

Современные результаты рентгеновских наблюдений позволяют изучить зависимость корональной активности от периода вращения. На основе каталога активных F-M-звезд, составленного по рентгеновским наблюдениям на космических аппаратах *Einstein*, *ROSAT*, *XMM-Newton* Wright et al. [2011] и Reiners et al. [2014] уточнили зависимость индекса  $R_X = \log L_X/L_{bol}$  от периода вращения для всех F, G, K, M звёзд. Им удалось однозначно выделить звёзды с насыщением активности  $R_X = -3$  и с активностью солнечного типа. Если в первом случае эта величина практически не зависит от периода вращения, то во втором она меняется от уровня насыщения  $R_X = -3$  до уровня современного спокойного Солнца  $R_X = -7$  при замедлении вращения звезды. При анализе звёзд солнечной массы нам удалось модифицировать метод анализа данных этого же каталога и построить соответствующую зависимость отдельно для G, K, M звёзд [Низамов и др., 2017]. Получено, что переход от одного режима активности к другому происходит при периодах вращения 1.1, 3.3 и 7.2 суток для звезд спектральных типов G2, K4, M3 соответственно. Этот результат означает, что у звезды с массой Солнца эпоха активности солнечного типа охватывает широкий интервал периодов вращения, т. е. продолжается примерно от ста миллионов до нескольких миллиардов лет.

Только сейчас появляются данные, которые позволяют судить об изменении характера активности солнечного типа с возрастом звезды. Во-первых, данные КА *Kepler* отчётливо показывают, что звёзды одного и того же спектрального типа демонстрируют два уровня активности. Бимодальность проявляется как в амплитуде вращательной модуляции, связанной с относительно площадью пятен и их концентрацией к определённой долготе, так и в распределении по периодам осевого вращения [McQuillan et al., 2014]. Синусоидальные изменения яркости звезды лучше выражены у более молодых звёзд и сохраняются в течение ряда лет.

Во-вторых, характер циклической активности различается у звёзд с периодами вращения 1–10 дней и 10–40 дней. Быстро вращающиеся звёзды обладают короткими циклами с периодами от 1–4 года, в то время как у звёзд с уровнем активности, близким к солнечному, цикл напоминает 11-летние изменения (или магнитный 22-летний цикл). Квазидвухлетняя переменность потока излучения Солнца выражена очень слабо и выявляется надёжно только в данных гелиосейсмологии.

В-третьих, по данным КА *Kepler* обнаружены вспышки на поздних звёздах с очень большой полной энергией, значительно превышающей не только энергию самых мощных явлений на Солнце, но и ожидаемые оценки, основанные на наблюдениях магнитных полей. Оказалось, что такие события происходят на быстровращающихся звёздах, несколько явлений зарегистрировано на звёздах с периодами около 15 дней и отсутствуют у звёзд, вращающихся медленнее. Это следует из результатов ряда работ, и здесь мы приводим распределение числа вспышек с полной энергией более  $10^{33}$  эрг по периодам осевого вращения [Katsova, Livshits, 2014]. Далее, мы проанализировали эти наблюдательные данные с точки зрения того, насколько представления о солнечных вспышках применимы к объяснению супервспышек на звёздах [подробнее см. Katsova, Livshits, 2015].

Кроме того, ранее мы показали, что обилие лития коррелирует с уровнем активности [Mishenina et al., 2012]. Действительно, быстро вращающиеся активные поздние звёзды характеризуются заметным содержанием лития по сравнению с G карликами с периодами вращения более 10 дней.

Таким образом, анализ рентгеновского излучения корон, бимодальность распределения относительной площади пятен по периодам вращения для звёзд данного спектрального класса, развитие быстрых и медленных циклов, частота появления супервспышек свидетельствует о существенном различии характеров активности среди звёзд с активностью солнечного типа, уровень которой определяется вращения. Это позволяет отделить эпоху самого раннего Солнца (*the Baby Sun*) от эпохи молодого Солнца (*the Young Sun*). Анализ мягкого рентгеновского излучения G-звёзд показывает, что самые молодые, быстро вращающиеся звёзды характеризуются насыщением активности, но, уже начиная с периодов вращения 1.4 дня, часть звёзд демонстрирует активность солнечного типа. Такой тип активности,

при котором формируются пятна, вспышки и т.п., сначала нерегулярен, и только затем появляются условия для формирования циклов. По характеру активности условно назовём G-карлики с периодами вращения от 1 до примерно 5 дней термином *the Baby Sun* (с максимальным количеством таких звёзд с  $P_{\text{rot}} = 3$  дня), а G-звёзды с  $P_{\text{rot}}$  от 8–9 до 18 дней – *the Young Sun*. Возраст основной массы звёзд типа *the Baby Sun* составляет примерно 200–600 млн лет, *the Young Sun* – 1–2 млрд лет. Эти два семейства пересекаются, и общая часть располагается в области  $R_X = -4.5$ . Активность молодого Солнца детально описаны нами в работах Katsova, Livshits [2014] и Кацова, Лившиц [2014]. В области периодов 7–9 дней происходят качественные изменения характера активности солнечного типа. Более молодые объекты часто демонстрируют вращательную модуляцию яркости, что указывает не только на большую относительную площадь пятен, но их возрастающую концентрацию к фиксированным долготам и возможное развитие высокоширотных пятен. Важно также изменение других свойств активности, таких как длительность циклов, частота появления мощных вспышек. Это вероятно связано с тем, что на молодых звёздах сильно проявляется влияние крупномасштабного полоидального магнитного поля на формирование активности [Rosén et al., 2016].

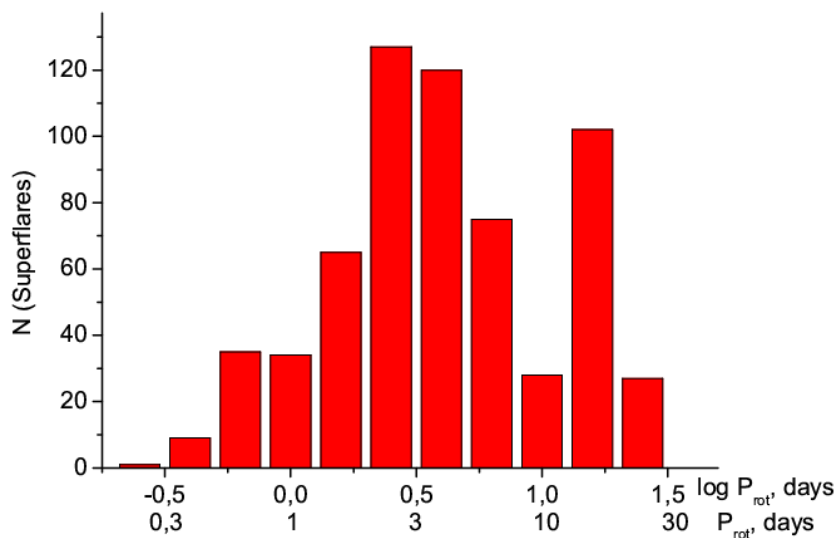


Рис. 1. Распределение числа супервспышек в зависимости от периода осевого вращения звёзд.

Как следует из таблицы 1, индекс корональной активности при переходе от звёзд *the Baby Sun* к *the Young Sun* мало меняется, находясь около уровня  $R_X = -4.5$  у трёх звёзд промежуточного типа, которые обладают характеристиками обеих групп. Отметим, что короткий цикл длительностью 1.6 года зарегистрирован на звезде *iota* Hor в мягком рентгене и в линиях H и K CaII [Stelzer, 2016]. Таблица содержит один пример – звезды HD 220476 (NX Aqr), в ИК-области спектра которой присутствуют свидетельства остатков пылевого протопланетного облака.

Таблица 1. Общая характеристика активности *the Baby and the Young Sun*

	Spectrum	$P_{\text{rot}}, \text{d}$	S, %	$L_X, \text{erg/s}$	$R_X$
Active Sun	G2 V	25	0.3	$10^{27}$	-7
<b><i>The Young Sun</i></b>					
BE Cet	G2 V	8	3	$10^{29}$	-4.4
$\kappa^1$ Cet	G5 V	9		$10^{29}$	-4.4
iota Hor	F8 V	8 – 8.5		$6 \cdot 10^{28}$	-4.63
NX Aqr	G5 V	7		$> 10^{28}$	-4.42
<b><i>The Baby Sun</i></b>					
EK Dra	G0 V	2.5 – 3	10-20	$10^{30}$	-3
HD 35296	F8 V	3.5	10–20	$3 \cdot 10^{29}$	-4
HD 29615	G2 V	2.3			

Типичным представителем *the Baby Sun* является звезда EK Dra с мощной короной, рентгеновское излучение которой соответствует уровню насыщения. Возраст звёзд этого типа около 100 млн лет. В режиме насыщения уровень активности практически не зависит от вращения, в то время как в эпоху *the Baby Sun* активность корон начинает определяться скоростью вращения звезды.

### 3. Коротковолновое излучение *the Baby Sun*

Для обсуждения проблем происхождения биосферы и геологической истории Земли существенно представлять, каковы были интенсивность коротковолнового излучения, квазистационарные истечения плазмы и потоки частиц различных энергий при вспышках, определяющих радиационную обстановку. Полная (болومترическая) светимость Солнца в эпоху образования планетной системы была ниже современной не более чем на 30%. Однако мягкое рентгеновское излучения солнечной короны было на 3–4 порядка выше, чем сегодня. Первые успешные оценки потоков коротковолновой радиации молодого Солнца получены в рамках проекта “*Sun-in-Time*”. Данные для пяти звёзд в области 1–1700 Å по отдельным участкам спектра представлены в работе Ribas et al. [2005].

В настоящее время можно уточнить эти результаты на основе современных наблюдений значительно большего массива звёзд. Мы обратились к измерениям на КА *GALEX (Galaxy Evolution Explorer)*, предварительные результаты изучения многоцветной фотометрии 2680 звёзд (19% двойных систем были исключены) представлены Findeisen et al. [2011] вместе с определениями индекса хромосферной активности. Полосы чувствительности были достаточно широкими и по уточненным измерениям составляли NUV 1750–2750 Å и FUV 1350–1750 Å. Данные о 1360 звёздах, для ко-

торых были измерения в области далекого ультрафиолета (FUV), в работе Murgas et al. [2013]. Мы отобрали 18 G звёзд, в основном, главной последовательности и проанализировали область FUV, которая сильнее зависит от уровня активности и в ней отсутствовал эффект насыщения потоков. Для этих выбранных объектов приведены абсолютные потоки в области FUV, и эти звёзды наблюдались также на КА *HIPPARCOS*, так что для них имеются данные о расстояниях.

Ниже, в таблице 2 приведены данные об этих 18 G звёздах. В Каталоге указано, что из этих звёзд одна – HD 183414 может рассматриваться как молодая звезда типа post T Tau (PMS) и другая – HD 29461 является членом рассеянного скопления Гиад. Индекс хромосферной активности  $R_{HK}$  для HD 29461 составляет– 4.55.

В табл. 2 приведены названия звёзд, их параллакс, измеряемые потоки в мкЯн, спектр звёзд, потоки, пересчитанные на 1 а.е. в единицах эрг/(см<sup>2</sup> с), и разделенные на соответствующий поток от Солнца.

**Таблица 2.** Коротковолновое излучение G звёзд по данным *GALEX*.

Name	HIP	Parallax	FluxGal	SpClass	Flux 1ae	FluxStSun
HD 224540	118207	23,37	15,77	G0	6,2	3,1
HD 206658	107246	20,97	40,76	G0	19,902	9,951
HD 183414	96334	28,22	82,48	G3V	22,238	11,119
HD 138159	75923	15,22	16,67	G3V	15,451	7,733
HD 19423	14339	18,85	20,81	G2V	12,575	6,288
HD 212619	111153	16,56	17,08	G3V	13,373	6,686
HD 131179	72703	25,68	33,09	G5/6V	10,774	5,387
HD 29461	21654	20,81	65,25	G5	32,352	16,176
HD 218614	114340	19,53	27,5	G5V	15,481	7,74
HD 221343	116122	19,06	29,22	G2V	17,27	8,635
HD 119824	67120	22,14	20,69	G0	9,063	4,531
HD 12264	9349	22,08	44,65	G5V	19,665	9,832
HD 214867	112052	18,88	17,46	G3V	10,517	5,259
HD 109360	61331	19,13	10,21	G5	5,99	2,995
HD 211847	110340	21,12	31,78	G5V	15,298	7,649
CD-33 15016	101459	11,64	6,49	G2	10,285	5,142
HD 222628	116959	11,28	6,39	G2V	10,783	5,392
HD 30386	22073	11,06	6,78	G3V	11,9	5,95

Для последующего сравнения с Солнцем мы пересчитали потоки излучения для расстояния в 1 астрономическую единицу (а.е.). Видно, что только HD 29461 и, возможно, очень молодая звезда HD 183414 характеризуются несколько большими потоками излучения. Без этих двух звёзд среднее значение потока на 1 а.е. составляет  $12.8 \pm 4.2$  эрг/(см<sup>2</sup> с). Для сравнения мы сопоставили полученные величины с теми, которые соответствуют Солнцу и карпа<sup>1</sup> Cет, спектр которых приведен на рис. 7 работы

Ribas et al. [2010]. Энергия солнечного излучения в указанной полосе FUV очень близка к  $2 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \text{ с})$ , в чем можно убедиться, проинтегрировав величины, приведенные на том же рис. 7. Отсюда следует, что во всей полосе 1350–1750 Å средний контраст звёзд, которые мы условно относим к *the Baby Sun*, составляет 6.4.

Спектр звезды  $\kappa$  Ceti<sup>1</sup> мало отличается от солнечного, и только в самой коротковолновой области FUV-диапазона контрасты примерно равны 6. Для G звёзд со значительными потоками, регистрируемыми в диапазоне FUV, высокий контраст сохраняется фактически во всем этом диапазоне. Разумеется, в коротковолновой части контраст может быть очень большим и также уменьшаться на более длинных волнах.

На рис. 2 работы Murgas et al. [2013] сопоставлены избытки цвета FUV–с индексом хромосферной активности для звёзд с высокими пространственными скоростями. Там отчетливо проявляется бимодальность этого распределения. Имеются основания предполагать, что большая часть G звёзд, представленных на этом рисунке и входящая в группу с повышенной хромосферной активностью, относится к группе *the Baby Sun*.

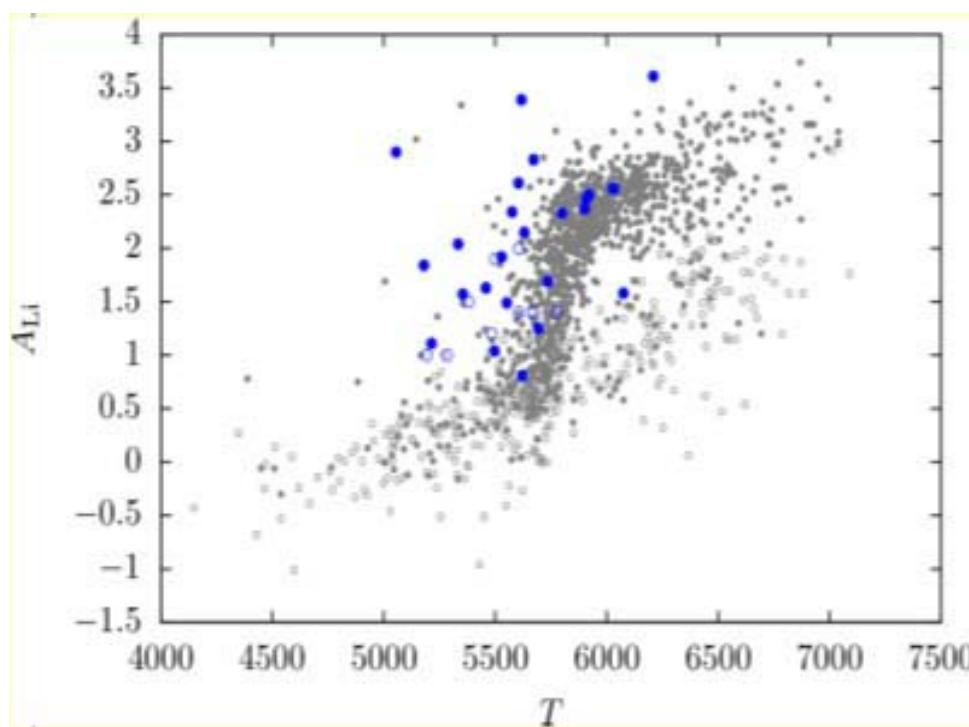
#### 4. Звёзды с повышенным содержанием лития и супервспышки

На диаграмме связи между корональной и хромосферной активностью в области периодов между 10 днями и примерно 1 днем располагаются звёзды, характеризующиеся как высоким обилием лития, так и большой частотой супервспышек. Особенно отчетливо это проявляется, когда рассматриваются только G звёзды. Действительно, для них при высокой активности наблюдается определённая корреляция между обилием лития и хромосферной активностью [Mishenina et al., 2012]. На самых больших телескопах хорошо наблюдается линия лития, как, например, на звезде  $\iota$  Hor (F8 V) [Zuckerman et al., 2013]. Литий является индикатором изменения уровня и характера активности с возрастом. Поэтому ещё лучше, чем на  $\iota$  Hor, литий наблюдается у тех звёзд, которые относятся нами к *the Baby Sun*.

На рис. 2 мы сопоставляем эти данные на фоне результатов Ramirez et al. [2012] определения обилия лития для 2000 ближайших F-, G- и K-карликов и субгигантов. Здесь, во-первых, видно, что у звёзд с супервспышками с эффективной температурой, как у Солнца, величина  $A(\text{Li})$  в 30 раз выше, чем у Солнца. Во-вторых, с определённой оговоркой можно утверждать, что зависимость  $\log A(\text{Li})$  от  $T_{\text{eff}}$  для звёзд с супервспышками сдвинута примерно на 200–300 K в сторону K-звёзд относительно фоновых звёзд.

Отметим ещё одно отличие звёзд с супервспышками от других переменных звёзд, зарегистрированных на КА *Kepler*. По амплитуде вращательной модуляции потоков излучения в оптической и ближней ИК-области обнаруживается бимодальное распределение числа звёзд по пери-

одам вращения. Этот результат получен по данным о 34030 F–M звёздах главной последовательности [McQuillan et al., 2014]. Для этих звёзд найдено, что наибольшее количество звёзд концентрируется близ основного периода, и существует определённая группа звёзд, вращающихся быстрее. Для G-звёзд эти периоды близки к 20 суткам и 3–5 дням. Напротив, основная масса звёзд с супервспышками, как и количество мощных событий, характеризуется периодами вращения от нескольких часов до 7–8 дней. В то же время существует некоторое количество звёзд с супервспышками, вращающихся медленнее, с периодами 12–14 дней.



**Рис. 2.** Обилие лития  $\log A(\text{Li})$  у звёзд с супервспышками на фоне 2000 ближайших F-, G- и K- карликов и субгигантов по данным Ramirez et al. [2012]. Открытые кружки – верхние пределы значений обилия лития. Шкала по оси Y логарифмическая, для Солнца принято  $A_{\text{Li}} = 1$ .

В настоящее время имеется возможность оценить частоту появления супервспышек на поздних звёздах. Для Солнца возьмем в качестве среднего солнечного цикла XXI цикл, и по базе данных ИЗМИРАН найдем число вспышек баллов M и X. В период близ максимума этого цикла 1979,8 – за три года – 1979, 1980 и 1981 гг. – произошло 1237 M-вспышек и 82 X-вспышки. Отсюда получаем частоту событий 0.047 и 0.00312 вспышек в час для M- и X- вспышек соответственно (логарифмы этих величин –1.328 и –2.506). Полную энергию этих событий примем равной  $10^{31}$  и  $10^{32}$  эрг соответственно для M5- и X5- событий.

По данным КА *Kepler* Shibayama et al. [2013] оценили частоту появления супервспышек с полной энергией более  $10^{34}$  для двух групп звёзд с пе-

риодами около 3 и более 10 дней. Она составляет около  $2 \times 10^{-33}$  эрг на одну звезду в год и  $2 \times 10^{-37}$  эрг на одну звезду в год соответственно. Отсюда количество вспышек с полной энергией  $10^{34}$  эрг на одной активной звезде в год оценивается величиной 0.2 – одна вспышка в 5 лет и 0.002 – одна вспышка в 500 лет. Принимая наше выделение эпохи *the Baby Sun*, как относящейся к G звёздам с периодами 1–2 дня приходим к такой оценке: гигантские вспышки с полной энергией  $10^{35}$  эрг могут происходить на *the Baby Sun* примерно один раз в год.

Кратко остановимся далее на проблеме звёздного ветра на молодых звёздах. Здесь имеются очень детальные теоретические расчёты O. Cohen, J.J. Drake [2014]. Недавно появилась работа do Nascimento, Jr. et al. [2016] о звёздном ветре и модели магнитосферы звезды  $\kappa^1$  Cet (G5 V) с планетой «Земля», которая уже учитываются последние данные о крупномасштабном магнитном поле. Здесь уровень истечения плазмы оказался близок к  $dM/dt = 9.7 \times 10^{-13} M_{\text{Sun}}/\text{год}$ . Это на 1–2 порядка превышает темп потери массы современным Солнцем. К сожалению, пока нет надёжных наблюдательных подтверждений теоретических предсказаний скорости и плотности звёздного ветра на поздних звёздах главной последовательности.

## 5. Заключение

Использование новых методов наблюдений и численного моделирования процессов позволило существенно продвинуться в проблеме определения возраста и эволюции активности звёзд с массой, близкой к солнечной. Стало ясно, что уже невозможно описывать солнечную активность единым образом на протяжении всей жизни звезды на главной последовательности. В работе выделен период самого молодого Солнца, *the Baby Sun*, и изучены характеристики активности в эпоху формирования планет. Оказалось, в это время *the Baby Sun* характеризуется мощным рентгеновским излучением, супервспышками, большим обилием лития в атмосфере. Именно в эту эпоху формируются магнитные поля, которые эволюционируют по своим законам и определяют характер активности на протяжении последующих миллиардов лет. Знание радиационной обстановки, излучения и может помочь в изучении условий на ранней Земле, потоков плазмы от Солнца в эпоху формирования солнечной системы.

Работа выполнена в рамках проектов, поддержанных грантами РФФИ 15-02-06271 и Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ 9670.2016.2.

## Литература

- S. A. Barnes, J. Weingrill, D. Fritzewski, K. G. Strassmeier*, 2016, *Astrophys. J.* V. **823** (1), art. id. 16, 16 pp  
*O. Cohen, J.J. Drake*, 2014, *Astrophys. J.*, V. 783 (1), art. id. 55, 11 pp

- K. Findeisen, L. Hillenbrand, D. Soderblom*, 2011, *Astron. J.*, V. **142**, (1), art. id. 23, 17 pp.
- M. M. Katsova, M.A. Livshits* 2014, *Geomagn. Aeronomy*, 2014, V. **54**, No. 8, P. 982–990.
- M.M. Кацова, М.А. Лившиц*, 2014, in: *Cosmic factors of evolution of biosphere and geosphere*" Ed. V.N. Obridko, *Proc. of the Colloquium, Moscow, May 21-23, 2014*, V. 1, P. 67-80 (in Russian).
- M. M. Katsova, M.A. Livshits*, 2015, *Solar Physics*, V.**290**, Issue 12, P. 3663-3682
- A. McQuillan, T. Mazeh, S. Aigrain* 2014, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* V. **211**, P.24.
- S. Messina, S. Desidera, A. C. Lanzafame, M. Turatto, E. F. Guinan*, 2011, *Astron. Astrophys.* V.**532**, id.A10, 45 pp
- T. Mishenina, C. Soubiran, V. Kovtykh, M. Katsova, M. Livshits*, 2012, *Astron. Astrophys.*, V.**547**, P.106.
- F. Murgas, J.S. Jenkins, P. Rojo, H.R.A. Jones, D.J.Pinfield*, 2013, *Astron. Astrophys.*, V. **552**, id.A27, 8 pp
- J.-D. do Nascimento, Jr., A.A. Vidotto, P. Petit, C. Folsom, et al.*, 2016, *Astrophys. J. Letters*, V. **820** (1), art. id. L15, 6 pp
- Б. А. Низамов, М. М. Кацова, М.А. Лившиц* 2017, *Письма в Астрон.журн.* Т.**43** № 2
- I. Ramirez, J.R. Fish, D.L. Lambert*, 2012, *Astrophys. J.* V. **756**, P.46.
- A. Reiners, M Schüssler, V.M. Passegger*, 2014, *Astrophys. J.* V. **794**, P. 144.
- I. Ribas, E. F. Guinan, M. Güdel, M. Audard*, 2005, *Astrophys. J.* V. **622**, (1), P. 680-694
- I. Ribas, G. F. Porto de Mello, L. D. Ferreira et al.* 2010, *Astrophys. J.* V. **714**, P.384–395.
- L. Rosén, O. Kochukhov, T.Hackman, J. Lehtinen*, 2016, *Astron. Astrophys.* V. **593**, id.A35, 24 pp.
- T. Shibayama, H. Maehara, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagao, S. Honda et al.* 2013, *Astrophys. J. Suppl.* V. **209** (1), art. id. 5, 13 pp
- B. Stelzer*, 2016, arXiv:1611.07794.
- B. Zuckerman, L. Vican, I. Song, A. Schneider.* 2013, *Astrophys. J.* V.**778** (1), art. id. 5, 12 pp.
- N. J. Wright, J.J. Drake, E.E. Mamajek, G.W. Henry*, 2011, *Astrophys. J.* V.**743**, P.48.

## **Chapter 5**

### **ACTIVITY OF THE BABY SUN**

© **M.M. Katsova<sup>1</sup>, M.A. Livshits<sup>2</sup>, T.V. Mishenina<sup>3</sup>, B.A. Nizamov<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

<sup>3</sup>*Astronomical Observatory, Odessa National University, Odessa, Ukraine*

<sup>4</sup>*Department of Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

An analysis of the X-ray radiation of G-stars shows that the youngest fast rotating stars are characterized by saturation of activity, but part of stars demonstrate the solar-type activity, starting from rotational periods of 1.4 days. This type of activity, the level of which is determined by the rate of axial rotation, includes the formation of spots, flares and etc; first, activity is irregular, and only then there are conditions for the formation of cycles. The Kepler data show that stars of the same spectral type demonstrate two activity levels. This bimodality of different distributions of stars, change in a character of cycles and a level of

flare activity are evidences for an evolution of activity versus the age. By the nature of activity, we call conditionally G-dwarfs with rotation periods from 1 day to 5–6 days by the term “the Baby Sun” (the maximal number of these stars has  $P_{\text{rot}} = 3$  d), and we refer G-stars with  $P_{\text{rot}}$  from 10 to 18 days to “the Young Suns”. Ages of the main amount of the Baby Sun are around 200–600 Myr and the Young Sun are of about 1–2 Gyr. The Baby Suns are characterized by enhanced lithium content. We estimate the quasi-stationary X-ray and far-ultraviolet radiation of the outer atmosphere of the Baby Sun. From the GALEX data we obtain the FUV flux in the range 1350–1750 Å for this kind of stars at the distance of 1 AU is  $12.8 \pm 4.2$  erg/(cm<sup>2</sup> s), that exceeds the FUV-flux of the contemporary Sun by more than 6 times. The Kepler data demonstrate that the superflares happen more often namely on the Baby Suns. Our estimate is that superflares of the total energies  $10^{35}$  erg occur on the Baby Sun of about one per year.

## **Глава 6**

### **О ПАРАДОКСЕ СЛАБОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА**

© **Е.Г. Храмова**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*

*Памяти Евгения Руденчика*

Согласно астрофизическим моделям светимость молодого Солнца должна была быть на 30% ниже современной, а по палеоклиматическим данным температура поверхности Земли в Архее даже несколько превышала современные значения. В статье проведен анализ некоторых существующих вариантов объяснения этого несоответствия, обращено внимание на ряд неучтенных обстоятельств и предложена новая гипотеза решения парадокса.

#### **Физические предпосылки парадокса**

Парадокс слабого молодого Солнца в 1972 году сформулировали американские астрономы Карл Саган и Джордж Маллен [9] и заключается он в противоречии между палеоклиматическими данными и астрофизическими моделями эволюции Солнца.

Исходя из звездного моделирования, солнечная светимость 4 млрд. лет назад составляла примерно 70% современной, что должно было бы привести к замерзанию планеты. По данным же палеонтологов средняя температура на Земле в этот период была около 60–70°C.

Карл Саган и Джордж Маллен первыми предложили искать решение парадокса в увеличении парникового эффекта на молодой Земле за счет большей, чем сейчас, концентрации парниковых газов. С тех пор появилось много работ, в которых предприняты попытки смоделировать раннюю земную атмосферу с достаточно высоким парниковым эффектом, однако удовлетворительного решения пока не найдено. При детальном рассмотрении гипотезы возникли трудности, например, есть ограничение на значительное повышение концентрации одного из самых значимых парниковых газов – углекислого – со стороны минералогии.

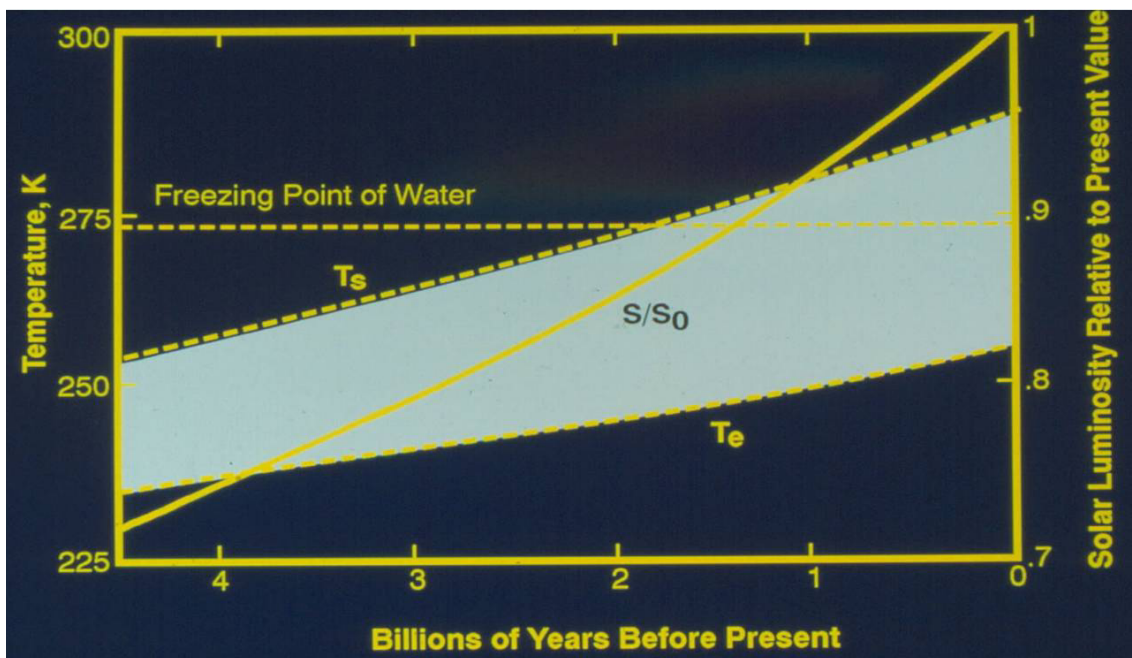
Предложены и другие гипотезы решения парадокса, в основном за счет уменьшения альбедо молодой Земли, разогрева поверхности метеоритами или изменения солнечной постоянной. Но ни одна из них на данный момент не считается достаточно убедительной. Слабых сторон некоторых гипотез коснемся позже.

Рассмотрим подробнее природу парадокса. В соответствии с законом Стефана-Больцмана, равновесное тепловое излучение Земли описывается формулой:

$$L(1 - A) = 4\sigma T_e^4,$$

где  $L$  – солнечная постоянная,  $A$  – альbedo Земли,  $T_e$  – эффективная температура Земли,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана. Современное значение  $T_e = 249\text{ K} = -24\text{ }^\circ\text{C}$ .

Следовательно, Земля и сейчас была бы оледеневшей, если бы не свойство ее атмосферы: достаточная прозрачность в видимом диапазоне и значительно меньшая прозрачность в инфракрасном. За счет этого атмосфера лучше пропускает солнечное излучение к земной поверхности, чем инфракрасное излучение от нее. Это явление получило название «парниковый эффект» и было открыто Жозефом Фурье еще в 1827 году. Величина парникового эффекта  $\Delta T = T_s - T_e$ , где  $T_s$  – средняя приповерхностная температура земной атмосферы. В настоящее время  $T_s = 288\text{ K} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ , а значение  $\Delta T$  составляет 39 K. На графике (рис. 1), приведенном Джеймсом Кастингом [5], наглядно проиллюстрированы временные зависимости поверхностной и эффективной температур Земли и кривая солнечной светимости. Однако там есть один весьма спорный момент, к которому вернемся позже.



**Рис. 1.** На графике пунктиром отображены временные зависимости эффективной и поверхностной температуры Земли, температура замерзания воды, сплошной линией – изменение солнечной светимости на Главной последовательности.

Из приведенных выше уравнений очевидно, что для разрешения парадокса возможны следующие варианты:

- 1) значительно меньшее альbedo молодой Земли,
- 2) более мощный парниковый эффект,
- 3) неучтенные дополнительные источники энергии,
- 4) некорректно посчитанная солнечная постоянная молодого Солнца.

### Солнечная постоянная

В 2008 г. астрофизик Пит Мартенс [6], проанализировав варианты с коллективом специалистов из разных областей, счел все из них маловероятными, кроме последнего. По предположению Мартенса, увеличение массы молодого Солнца всего на 5% могло бы решить проблему.

Надо отметить, что кроме роста светимости звезд, вызванного изменением плотности при замещении выгорающего водорода гелием, наблюдается зависимость светимости от массы. Для звезд Главной последовательности с массой, близкой к массе Солнца, светимость пропорциональна массе примерно в четвертой степени. Эта зависимость светимости от массы эмпирическая.

Пит Мартенс исходил из рассуждений:

- Солнечная светимость сильно зависит от массы:  $L_{\odot} \sim M_{\odot}^4$ .
- Планетарное орбитальное расстояние обратно пропорционально солнечной массе:  $a \sim M_{\odot}^{-1}$ .
- Поток солнечного излучения обратно пропорционален квадрату орбитального расстояния:  $S \sim a^{-2}$ .
- Получается, что поток солнечного излучения на орбитальном расстоянии планеты:  $S \sim M_{\odot}^6$ .
- Итак, чтобы поток излучения молодого Солнца на орбите Земли был примерно таким, как сейчас, и скомпенсировал эффект слабого молодого Солнца (30%), его масса должна была быть на ~5% больше, чем сейчас.
- Следовательно, требуемая потеря массы ~1% в миллиард лет, т.е. должна составлять за год  $10^{-11}$  солнечных масс.
- Наблюдаемая потеря массы составляет за год  $2-3 \cdot 10^{-14}$  солнечных масс.
- Это в 300 раз меньше необходимого!

Однако молодые звезды теряют массу более интенсивно вследствие значительно более высокой активности. Наблюдаемая потеря массы молодых солнцеподобных звезд до  $3 \cdot 10^{-12}$  солнечных масс. Отсюда Пит Мартенс делает вывод, что полученная потеря массы лишь в 2–4 раза меньше необходимой для решения парадокса, и надо продолжать поиск в этом направлении.

Следовало бы учесть, что такая интенсивная потеря массы характерна только для молодых звезд, со временем поток падает до  $2-3 \cdot 10^{-14}$  солнечных масс в год. Даже если предположить, что падение происходит равномерно, то средняя потеря массы составит примерно  $\sim 1.5 \cdot 10^{-12}$  солнечных масс в год, а это в 6,7 раз меньше необходимых 5%.

На наш взгляд, из полученных результатов можно сделать вывод, что изменение солнечной постоянной не могло полностью скомпенсировать недостающие 30% потока солнечного излучения, но, возможно, уменьшило недостачу не более чем на 4–5%.

В поддержку своей гипотезы Пит Мартенс предлагает воспользоваться замечательным философским принципом «Бритва Оккама»: «Не следует множить сущности без необходимости». И обращается к данным, свидетельствующим о наличии жидкой воды на раннем Марсе. Разумно было бы искать общую причину для решения проблем обеих планет. По мнению Мартенса такой причиной является солнечная постоянная. Однако расстояние от Солнца до Марса составляет 1,52 а.е., поток солнечного излучения на его орбите примерно на 57% ниже, чем на земной. Так что, даже если бы удалось решить за счет увеличения солнечной постоянной парадокс для молодой Земли, парадокс слабого молодого Солнца для Марса составил бы более 50%. Очевидно, это решение никак не согласуется с «Бритвой Оккама».

### **Геотермальный поток**

Посмотрим, есть ли достаточные основания, чтобы скидывать со счетов другие варианты решения парадокса. Из возможных неучтенных источников энергии основные – метеоритная бомбардировка и геотермальный поток. Метеоритная бомбардировка – кратковременное явление, так что здесь может иметь значение только ее влияние на парниковый эффект.

Современное среднее значение величины геотермального потока составляет 64–75 мВт/кв. м, что почти в 20 000 раз меньше потока солнечной энергии. Земная кора обладает очень низкой теплопроводностью, большая часть энергии уходит на тектонику плит, в связи с чем, при расчете теплового баланса Земли после появления у нее коры 4 млрд лет назад, вклад геотермального потока принято не учитывать.

Однако это не значит, что можно скидывать со счетов высокую температуру поверхности и атмосферы, которые должны были быть на тот момент. По новым данным палеомагнитологов [12], магнитное поле Земли уже 4 млрд лет назад было достаточно велико, следовательно, атмосфера молодой Земли была защищена от сдувания. Температура могла существенно повлиять на парниковый эффект, увеличивая влажность и концентрацию других парниковых газов в атмосфере. С другой стороны, при высокой влажности должны были возрасти облачность и альбедо. Без расчетов невозможно сказать, какой из противоположных эффектов окажется сильнее – увеличение альбедо или парникового эффекта. Это задача для климатологов.

Предполагаю, что при рассмотрении вклада геотермального потока не учтен еще один фактор: влияние близкой Луны. Две основные модели происхождения Луны дают схожие оценки начального радиуса молодой Луны. По теории Мегаимпакта этот радиус около 60 000 км ( $\sim 10 R_{\oplus}$ ). По теории коаккреции «Наиболее вероятной зоной для аккумуляции Луны из околосолнечного роя частиц и тел является пояс на расстояниях от 10 до  $30R_{\oplus}$ ,  $R_{\oplus}$  – радиус современной Земли (сейчас Луна обращается на рассто-

янии  $60.3R_{\oplus}$ » (из статьи этого сборника «Модели происхождения Луны...» Г.В. Печерниковой, Е.Л. Рускол).

Приливные силы обратно пропорциональны кубу расстояния, так что они могли быть примерно в 200 раз сильнее, чем сейчас. Это не дало бы ощутимого вклада в нагревание слоев верхней мантии, но могло существенно повлиять на механизм теплопередачи, добавив к теплопроводности через кору конвекцию мантии, воды и газов через тектонические швы и трещины в земной коре.

### Альbedo

Рассматривалась и возможность уменьшения альbedo Земли. Планетарное альbedo современной Земли около 30%. Из них две трети (20%) приходится на альbedo облаков, т. к. альbedo самих облаков очень высокое, в зависимости от типа и мощности облачного покрова от нескольких процентов до 70–80% (в среднем 50–60%) [19].

Имеются статистические данные [11], которые, однако, нельзя считать бесспорными [16] о влиянии галактических космических лучей на облачность. Предполагается, что высокоэнергичные ГКЛ, проникая в глубокие слои атмосферы, ионизируют их, создавая дополнительные центры конденсации, чем увеличивают низкую облачность. Именно низкая облачность обладает наибольшим альbedo, в то время как высокая, скорее, усиливает парниковый эффект. Уровень ГКЛ, как известно, моделируется межпланетным магнитным полем. Чем интенсивнее СМЕ (корональные выбросы массы), тем ниже уровень ГКЛ. Т.е. уровень ГКЛ тем ниже, чем выше солнечная активность. Наблюдая необыкновенно высокую интенсивность СМЕ (на три порядка выше, чем у современного Солнца) молодой звезды солнечного типа Каппа Кита, Кристофер Кэррофф [4] предположил, что высокая активность молодого Солнца должна была существенно снизить уровень ГКЛ и, соответственно, облачность. В чем увидел возможность решения парадокса слабого молодого Солнца.

Опровержение не заставило себя ждать. Колин Голдлатт и Кевин Занле [3] смоделировали земную атмосферу, убрав низкую облачность, и показали, что при этом Земля получит только половину недостающей энергии. Вообще-то, это очевидно без всякого моделирования: современное альbedo составляет те же 30%, на которые была меньше светимость молодого Солнца. Даже полностью убрав облачность, не получится понизить альbedo ниже 10% (только альbedo чистого океана составляет около 8%).

Но и здесь есть некоторый неучтенный аспект. Дело в том, что молодое Солнце не только снижало уровень ГКЛ, но и должно было генерировать на порядки более интенсивные и энергичные солнечные космические лучи (СКЛ). Возможно, энергии СКЛ хватало на сильную ионизацию только верхних слоев атмосферы, и они стимулировали высокую облачность, этим усиливая парниковый эффект. Тогда наложение двух эффек-

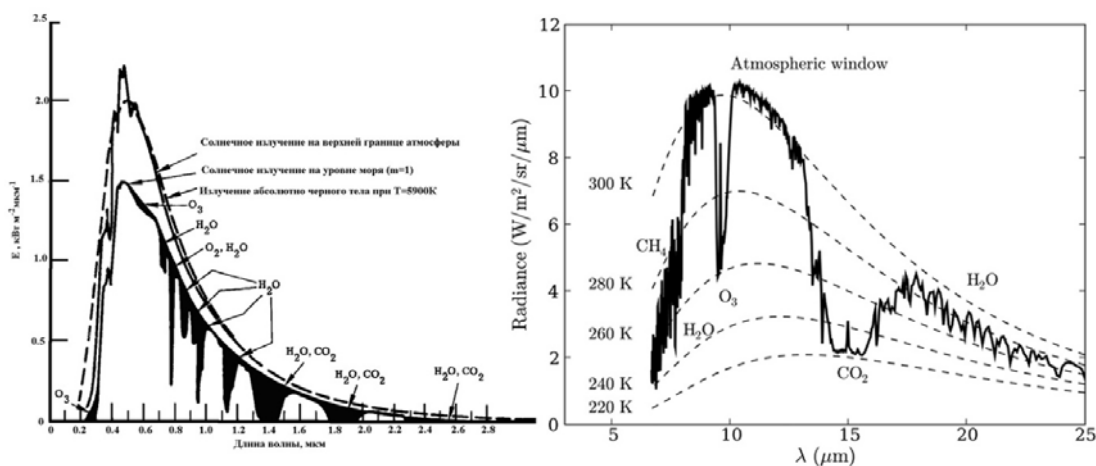
тов: недостаток низкой облачности и увеличение высокой вместе могли бы дать требуемый результат. Однако, возможно, имел место противоположный эффект, и интенсивность и энергия СКЛ при повышенной влажности (температура поверхности была выше современной), с лихвой компенсировали недостаток стимулирования облачности со стороны ГКЛ. Ответ можно было бы получить только после решения этой задачи с помощью моделирования.

### **Спектр солнечного излучения**

Для решения парадокса существенным может быть не только изменение солнечной светимости, но и спектра солнечного излучения. Дело в том, что при прохождении солнечного излучения сквозь земную атмосферу на рэлеевское рассеяние приходится примерно 30%. Из них треть излучается в космос, то есть примерно 10% теряется. Так как интенсивность рассеяния падает с уменьшением частоты излучения, спектральный сдвиг излучения молодого Солнца в холодную сторону мог бы сэкономить несколько процентов полученной Землей энергии.

Исходя из стандартной модели Солнца, солнечная светимость выросла не только за счет увеличения эффективной температуры Солнца, но и солнечного радиуса (радиус молодого Солнца составлял примерно 0.9 нынешнего). В результате, эффективная температура за 4.6 млрд. лет выросла незначительно от 5650 до 5770К, что соответствует спектральному сдвигу примерно в 100 Å (рис. 2 из статьи этого сборника «Светимость Солнца на Главной последовательности...» С.В. Аюкова и др.). Это могло дать лишь небольшую экономию энергии ранней земной атмосферой в пределах 1.5%.

Рассмотрим график прозрачности земной атмосферы для солнечного и теплового излучения Земли (рис. 2) [10]. Наиболее значимый парниковый эффект современной земной атмосферы достигается за счет водяного пара, углекислого газа, метана и озона. Вклад водяного пара около 60%, остальных газов меньше, в связи с их малой концентрацией. Однако парниковая активность углекислого газа выше, чем у водяного пара, а у метана и у закиси азота выше, чем у углекислого газа примерно в 25 и 300 раз соответственно. Кроме парниковой активности важен и спектр поглощения газов. Стоит учесть, что неограниченное увеличение концентрации какого-либо одного газа не приведет к неограниченному росту парникового эффекта благодаря порогу насыщения (пока их концентрации далеки от порога насыщения). Конечно, во много раз более мощный парниковый эффект на Венере обязан высокому содержанию углекислого газа, но он усилен атмосферным давлением, в 90 раз превосходящим земное. Если не предполагать значительного роста атмосферного давления, очевидно, что наиболее выраженный парниковый эффект даст присутствие в атмосфере разных парниковых газов с непересекающимися полосами поглощения.



**Рис. 2.** На левом графике – спектр излучения Солнца, наблюдаемый выше атмосферы Земли и на уровне моря. На правом – спектр наземного инфракрасного излучения, измеренного на высоте 70 км, над поверхностью с температурой в 305 К. Соответствующие парниковые газы обозначены вблизи пиков поглощения.

Видно, что водяной пар имеет полосы поглощения в разных областях инфракрасного излучения. Он хорошо поглощает как солнечное инфракрасное излучение, так и земное. Остальные парниковые газы поглощают в основном в диапазоне частот земного теплового излучения. Часть поглощенного паром инфракрасного излучения не доходит до поверхности, а переизлучается в космическое пространство. Если учесть, что с ростом влажности увеличится облачность и альbedo, а при температуре молодой Земли в 60–70 °С влажность должна была быть значительно выше современной, то ее вклад в увеличение парникового эффекта выглядит сомнительно. Для решения парадокса хорошо бы найти способ ограничить рост влажности, усилив при этом образование других парниковых газов.

### Температура Земли и солнечная светимость

Теперь вернемся к рис. 1. По сути, на нем правильно нанесены только две кривые: кривая солнечной светимости стандартной модели Солнца и прямая, соответствующая температуре замерзания воды.

Кривая эффективной температуры Земли  $T_e$  может быть примерно такой, как на рисунке, только в случае альbedo Земли, примерно равном нынешнему (30%). А для этого кривая средней поверхностной температуры  $T_s$  не должна опускаться ниже температуры замерзания воды, точнее, температуры замерзания океанов 271К. В противном случае резко возрастает альbedo, возможно, до 70–80% [14]. Поток солнечного излучения, поглощаемого поверхностью Земли, сокращается примерно в два раза. Как следствие, резко падает  $T_e$ , (примерно на 40°С) и существенно понижается  $T_s$ .

Мы рассмотрели, как вели бы себя температурные кривые, если бы солнечная светимость постепенно снижалась от современного уровня до уровня светимости молодого Солнца. Теперь допустим, что верны началь-

ные предположения о значениях  $T_e$  и  $T_s$ . Т. е. у нас имеется Земля-снежок с альбедо около 70%. Очевидно, что роста светимости на 30%, до современного уровня, без привлечения дополнительных факторов недостаточно для того, чтобы растопить Землю. Это является дополнительным серьезным аргументом в пользу теплой молодой Земли и демонстрирует не столь существенную зависимость поверхностной температуры планеты от солнечной светимости.

### Атмосферы планет земной группы: «Бритва Оккама»

Сравним термические характеристики Венеры, Земли и Марса. ( $T_R$  – температура без учета поглощения атмосферы и альбедо равно нулю). Результат, на первый взгляд, очевидный: температура поверхности планет падает по мере удаления от Солнца. Однако альбедо Венеры более 70%, в результате ее поверхность получает меньше тепла, чем земная, и эффективная температура на 25К ниже, чем у Земли. Как видим, высокая температура на поверхности Венеры обязана мощному парниковому эффекту ее атмосферы.

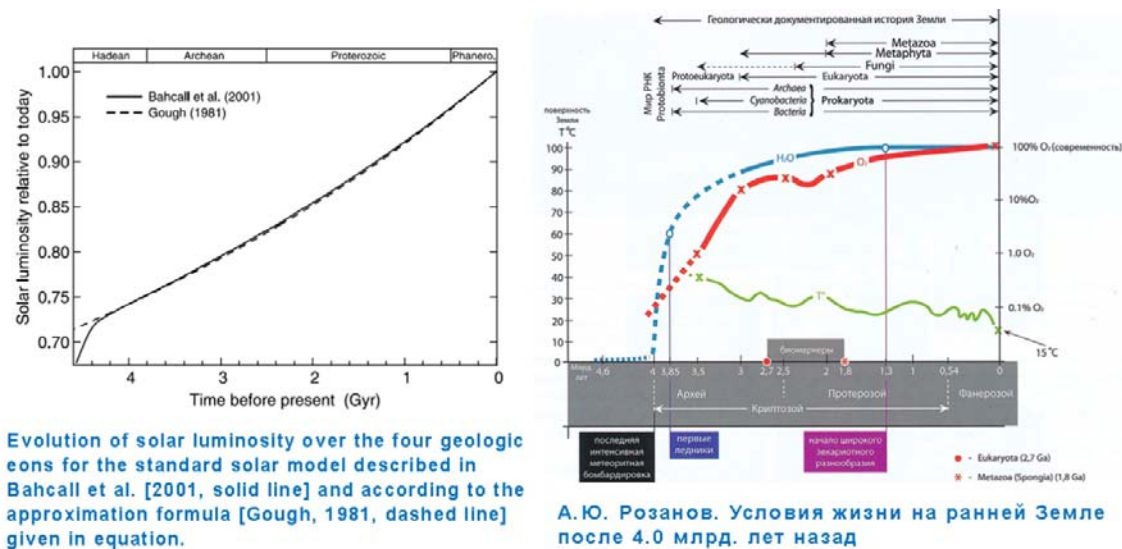
Планеты	Солнечная постоянная $S_0$ (Вт/м <sup>2</sup> )	Планетарное альбедо $A$ (%)	Эффективная температура $T_e$ (K)	Орбитальная температура $T_R$ (°C)	Ср. темп. поверхн. $T_s$ (°C)
Марс	589	15	210	- 48	- 53
Земля	1367	30	255 K = - 18°C	278 K = + 5°C	+ 15
Венера	2613	75	230	+ 58	+ 460

Теперь посмотрим на графики временных зависимостей солнечной светимости и поверхностной температуры Земли (рис. 3) [2, 18]. В парадоксе раннего молодого Солнца удивительно не только то, что при низкой светимости на Земле была высокая температура, но и то, что при постоянном росте светимости температура земной поверхности (зеленая кривая на правом графике) столь же неуклонно падает!

Попробуем и мы воспользоваться принципом «Бритва Оккама». Возможно ли найти единый фактор влияния на планеты, падающий с расстоянием от Солнца и со временем жизни Солнечной системы? Вспомним, что температура на молодом Марсе тоже была выше современной. Из солнечных характеристик на эту роль подходит солнечная активность. Активность молодого Солнца была значительно выше современной.

Как следствие, коротковолновое (гамма-излучение, рентген и ультрафиолет), радиоизлучение, корональные выбросы массы, солнечные космические лучи были на 2–3 порядка выше современных [15]. Влияние какого-либо из этих факторов (возможно, нескольких факторов сразу) на атмо-

сферы планет вполне могло бы объяснить все сложности парадокса. Похоже, что солнечная активность не только уменьшает ГКЛ и, как следствие,



**Рис. 3.** На левом графике – эволюция солнечной светимости за 4.5 млрд лет. Зеленой кривой на правом графике обозначено изменение поверхностной температуры Земли.

альбедо, но и прямо действует на парниковый эффект. Видимо, принцип влияния на атмосферы одинаковый, а реакции, возможно, разные, в зависимости от химического состава атмосферы. В результате образуются парниковые газы, в каждой атмосфере свои.

### Углекислый газ и минералогия

Миник Розинг, исследовав осадочные породы возрастом 3,8 млрд лет на юго-западе Гренландии, пришел к выводу, что содержание углекислого газа в атмосфере молодой Земли могло быть не более чем в три раза выше современного, чего явно недостаточно для обеспечения необходимого парникового эффекта [8]. Это следует из соотношения содержания в этих породах магнетита и сидерита (большие концентрации углекислого газа образованию сидерита способствуют, а магнетита – препятствуют).

Но есть и другая точка зрения на причины невысокого содержания сидерита: «Отсутствие карбонатолитов в самых ранних земных породах или малое их содержание в слоях древнее 3,5 млрд лет назад, несмотря на обилие CO<sub>2</sub> в атмосфере и гидросфере, можно объяснить только (возможно, <5) рН, иным составом гидросферы, в которой было растворено еще много не нейтрализованных сильных кислот, прежде всего HCl. По мере их нейтрализации и хотя бы локального повышения рН до <sup>^</sup>7 становилось возможным и химическое осаждение сидерита, доломита, магнезита, родохрозита и других карбонатов» [19]. Сидерит лучше растворяется в соляной кислоте, чем магнетит. Возможно, это явилось причиной обнаруженного Розингом соотношения минералов в породах?

### **Проблема углеводородной дымки**

Последнее время научным сообществом активно обсуждается возможность антипарникового эффекта на молодой Земле. В противоположность парниковому, при антипарниковом эффекте атмосфера планеты хорошо поглощает солнечное излучение и пропускает инфракрасное от нагретой поверхности. Пример выраженного антипарникового эффекта – атмосфера Титана. Там он вызван углеводородной дымкой, синтезируемой из метана и азота под воздействием ультрафиолета. На Титане антипарниковый эффект понижает температуру на 9К, при этом парниковый эффект атмосферы Титана повышает температуру примерно на 20К.

Сходный состав атмосферы Титана (состоящей на 95% из азота и на 5% из углеводородов) с гипотетической атмосферой молодой Земли вызвал предположение о возможности аналогичного антипарникового эффекта в архее. Это может сильно осложнить решение парадокса слабого молодого Солнца за счет парникового эффекта. Дело в том, что метан рассматривается как один из основных парниковых газов молодой Земли.

Авторы новых исследований [1] утверждают, что нельзя говорить об идентичности антипарникового эффекта на Титане и молодой Земле. Во-первых, плотность атмосферы Титана в 4 раза выше плотности земной атмосферы, поэтому без дополнительных исследований нельзя считать, что на Земле были синтезированы те же самые сложные углеводороды.

Во-вторых, содержание в атмосфере Земли углекислого газа и пусть небольшого количества кислорода должно значительно изменить состав органической дымки и увеличить разнообразие входящих в нее соединений. Некоторые из этих соединений обладают значительно большей поглощающей способностью ультрафиолета, чем углеводороды. Такие аэрозоли должны ограничивать синтез углеводородной дымки, уменьшая проникновение ультрафиолета в нижние слои атмосферы. Таким образом, включается механизм саморегуляции антипарникового эффекта. По их оценкам, антипарниковый эффект атмосферы молодой Земли не должен был сильно отразиться на ее температуре.

Хочу обратить внимание, что на Земле, в отличие от Титана, присутствовала жидкая вода, соответственно, имел место и процесс вымывания смога из атмосферы, что тоже могло уменьшать его концентрацию. Конечно, на Титане есть жидкий метан, но среднее количество осадков сравнимо с климатом засушливых земных пустынь.

И еще, при наличии в атмосфере парниковых газов в достаточно больших концентрациях антипарниковый эффект дымки должен резко снижаться, так как поглощает она видимый свет, но переизлучает в инфракрасном спектре. В такой атмосфере не столь существенно изменение энергетического баланса, сколь заметно изменение спектрального состава излучения, доходящего до поверхности.

К тому же, образование углеводородной дымки должно сильно снижаться достаточным содержанием в атмосфере углекислого газа, и хотя есть мнение, что содержание углекислого газа в атмосфере молодой Земли

не могло быть очень высоким, эту точку зрения нельзя пока считать неопровержимо доказанной.

### **Гипотеза органической пленки**

Итак, из всех предложенных решений парадокса слабого молодого Солнца вероятнее всего именно парниковый эффект способен с избытком компенсировать недостаток солнечной светимости. Возможно ли смоделировать ситуацию, при которой достаточно высокое содержание парниковых газов в атмосфере не противоречило бы данным минералогии? Благодаря способности углекислого газа к растворению в воде поддерживается определенный баланс его концентрации в атмосфере и в океане, зависящий от температуры.

Но химический состав молодого океана при наличии предполагаемой первичной бескислородной атмосферы должен был сильно отличаться от современного. Эти условия способствовали синтезу органических соединений. Логично предположить, что на поверхности океана при этом образовывалась органическая пленка. Наличие такой пленки нарушает газообмен между океаном и атмосферой, кроме того, она вносит изменения и в теплообмен.

Трудно однозначно сказать, каков мог быть химический состав этой пленки. Это требует дополнительных исследований. Возможно, он был весьма разнообразным. Пленка, находившаяся на границе раздела фаз, попадала под облучение ультрафиолетом, который хорошо пропускала бескислородная атмосфера. В результате фотодиссоциации должны были образовываться различные парниковые газы. В бескислородной атмосфере это в первую очередь метан, в меньших количествах углекислый газ, возможно, также оксиды азота. Среди продуктов реакции могла, наверное, быть и закись азота (мощный парниковый газ) в очень незначительных концентрациях. В процессе насыщения кислородом непрозрачность атмосферы для ультрафиолета увеличивается, и фотолиз органической пленки уменьшается, но усиливается ее окисление, выход продуктов разложения смещается в сторону углекислого газа. Таким образом, органическая пленка могла быть постоянным донором парниковых газов.

К тому же, пленка создает некий барьер для газообмена. Она, скорее всего, затруднит и поглощение, и испарение газов. К примеру, современная нефтяная пленка существенно влияет на газообмен и уменьшает испарение воды на 60% [13]. Это скажется и на теплообменных процессах, уменьшая перенос тепла за счет испарения, тем самым увеличивая температуру поверхностного слоя океана и, соответственно, поток инфракрасного излучения с поверхности. При этом возможно смещение температурного баланса в сторону увеличения температуры океана. Стоит учесть, что палеонтологические температурные данные основаны в первую очередь именно на характеристиках океанов.

Может создаться впечатление, что столь тонкий объект долго не существует и будет уничтожен волнами. Конечно, периодически пленка будет рваться, особенно в зоне прибоя. Но существенно это на ее цельность в открытом океане не повлияет. Еще в древности моряки поливали растительным маслом поверхность моря, чтобы сгладить волнение. Теоретическую основу этого явления разработал академик В.В. Шулейкин [21]. Помимо того, пленка будет постоянно возобновляться. И она не обязательно должна покрывать поверхность всего океана. Эффект будет зависеть от того, какой процент площади поверхности она занимает.

В то время как современная нефтяная пленка считается губительной для экосистемы, древний аналог мог быть неотъемлемой и значимой ее составляющей. Надо сказать, что и сейчас немалые площади поверхности океана покрыты нефтяной пленкой не антропогенного происхождения, значение которой в биохимических циклах еще недостаточно изучено. Эти природные разливы не нарушают экологического баланса и являются питательной средой примерно для ста различных видов микроорганизмов. Так и древние пленки становились основой одних из первых экосистем на Земле. Более того, микроорганизмы в процессе утилизации нефти тоже образуют парниковые газы, среди анаэробов есть и метаногены, и те, что выделяют углекислый газ.

В этой модели заложен механизм саморегуляции атмосферы: выше уровень ультрафиолета – больше парниковых газов, но при этом уменьшается количество пленки, что, в свою очередь, затормозит выделение парниковых газов, и наоборот. А когда появляются микроорганизмы, которые питаются пленкой, и они включаются в механизм терморегуляции. Тут уже не только химическая, но и биологическая обратная связь. Нельзя скидывать со счетов и возможность существования углеводородной дымки, которая тоже включится в механизм саморегуляции. При малой концентрации метана в атмосфере мало смога, поэтому высока интенсивность ультрафиолета, достигающего поверхности воды. Следовательно, усиливается разложение органической пленки, повышается концентрация парниковых газов, в том числе метана, что приводит к росту концентрации смога – и уменьшает интенсивность ультрафиолета.

Литология и палеонтология часто сталкиваются с труднообъяснимыми резкими изменениями концентраций каких-либо веществ. Наличие двух относительно изолированных буферных емкостей экосистем атмосферы и океана, степень изолированности которых может легко меняться, возможно, поможет в объяснении этих явлений.

В свете рассматриваемого парадокса особенно интересны в палеонтологической летописи моменты глобального оледенения (850 и 630 млн лет назад). Нет общего мнения насчет степени оледенения – от большей части поверхности подо льдом до полного оледенения (Земля-снежок). В эти периоды альbedo Земли значительно возросло, вплоть до 70% в варианте

Земля-снежок, и даже при современной солнечной светимости непонятно, как можно вывести планету из этого состояния.

Настолько повысить содержание парниковых газов представляется практически невыполнимой задачей. Этот парадокс нехваткой энергии вдвое превышает парадокс слабого молодого Солнца.

Наиболее разумным было бы найти способ уменьшения альбедо. Предполагаемые оледенения длились по несколько миллионов лет. Во-первых, могла осаждаться вулканическая пыль. При небольшой влажности, которая должна бы сопровождать столь низкую температуру, она бы не очень интенсивно покрывалась снегом. Представляется маловероятным, что вулканическая активность была настолько высока, что могла существенно сказаться на альбедо. А вот другой механизм выглядит более многообещающим. Он связан все с той же пленкой, покрывавшей поверхность океана. Нефть, поднимающаяся на поверхность воды, скапливалась подо льдом. Лед не пропускает ультрафиолет, под воздействием которого она разлагалась. Бактериальная флора, еще один фактор ее разложения, скорее всего, неактивна при столь пониженных температурах. Накопившаяся нефть благодаря диффузии поднималась сквозь лед [16]. Это процесс долгий, но и оледенения продолжались достаточно долго. Когда нефтяная пленка оказывалась на поверхности льда, она резко снижала альбедо. К тому же, оказавшись на поверхности, она начинала разлагаться под действием ультрафиолета или кислорода, что повышало содержание парниковых газов.

А вот вопрос, почему эти оледенения могли произойти, еще более занимателен. Возможно, к ним привели катастрофические явления, вроде падения астероида или взрыва супервулкана, однако удивительно, что последствия были столь грандиозны и столь долговременны. Возможно, оледенение – это реакция экосферы на какие-то катастрофические воздействия в целях сохранения биоты? Понижение температуры способствует анабиозу, в котором микроорганизмы способны находиться миллионы лет.

Оледенение может стимулироваться особыми микроорганизмами: бактерии *P. syringae* обладают белками, которые формируют кристаллы льда и ускоряют процесс замерзания воды [7]. В результате появления льда альбедо увеличится и похолодание усугубится.

Перечислим возможные механизмы влияния органической пленки на парниковый эффект:

1) Уменьшение возможно очень высокого альбедо при температуре поверхности 60–70 °С за счет ограничения влажности. И хотя альбедо нефтяной пленки (около 15%) выше альбедо чистого океана (около 8%), уменьшение облачности (альбедо облаков около 80%) должно снизить среднее альбедо.

2) Увеличение потока инфракрасного солнечного излучения, достигшего поверхности Земли (в связи с уменьшением влажности).

3) Постоянно пополняемый источник парниковых газов за счет фотодиссоциации органической пленки ультрафиолетом.

4) Возможное увеличение температуры океана в связи с уменьшением парообразования.

5) Изменение соотношения концентраций углекислого газа в океане и в атмосфере за счет нарушения газообмена, что может способствовать относительно быстрому накоплению газов в атмосфере. И, возможно, снимет несоответствие данным минералогии.

6) Увеличение парникового эффекта при росте солнечной активности вследствие повышения уровня ультрафиолета и другого ионизирующего излучения, что обуславливает зависимость поверхностной температуры планеты от солнечной активности. Т. е. эта гипотеза подчиняется логике поиска общей причины изменения поверхностных температур планет земной группы.

7) Наличие механизма саморегуляции парникового эффекта экосферой Земли.

8) Потенциальный способ выхода планеты из состояния глобального оледенения благодаря уменьшению альбедо вследствие загрязнения льда органикой.

### **Выводы**

1) Решение парадокса слабого молодого Солнца за счет изменения солнечной постоянной выглядит маловероятным, так как возможность потери Солнцем 5% массы (этот процесс должен быть относительно равномерным в течение 4,5 млрд лет) не подтверждается ни наблюдениями, ни астрофизическими моделями. К тому же, такой подход не объясняет постепенного остывания земной поверхности. Однако некоторая реальная потеря массы звездой могла незначительно уменьшить недостающие 30%.

2) Попытки решения проблемы одним только уменьшением альбедо несостоятельны, поскольку не способны скомпенсировать столь значительную нехватку солнечной энергии. Возможно, учитывая понижение ГКЛ в сочетании с воздействием на атмосферу высокоэнергетических СКЛ, можно было бы получить требуемый результат. Эта гипотеза нуждается в моделировании.

3) При рассмотрении геотермального потока не учитывается возможность конвективного переноса тепла, стимулированного влиянием близкой молодой Луны, что могло бы значительно увеличить вклад геотермальной энергии в разогрев поверхности молодой планеты.

4) Предложенный в данной статье вариант решения проблемы за счет органической пленки на поверхности океана нуждается в анализе климатологов и построении атмосферной модели.

Автор выражает особую благодарность В.Н. Обридко и М.В. Рагульской за активное участие в обсуждении гипотезы.

Неоценимую помощь в подготовке этого материала оказали консультации М.Б. Симакова, А.В. Белова, С.В. Старченко, С.В. Аюкова, В.А. Батурина, Г.В. Печерниковой, М.Я. Марова, А.Ю. Розанова, Н.И. Клиорина, М.А. Лившица.

### Литература

1. *G. Arney, S.D. Domagal-Goldman et al.*, *Astrobiology*, 16: 873-899, 2016.
2. *Georg Feulner*, *Rev.Geophys.* 50 (2012), RG2006.
3. *Colin Goldblatt, Kevin J. Zahnle*, *Nature* v.477 (7349), E3 (2011), 2011.
4. *C. Karoff, H. Svensmark*, *Astronomische Nachrichten*, 2010.
5. *Kasting et al.*, *Scientific American*, 1988.
6. *P.C.H. Martens*, *International Workshop on "Solar Variability, Earth's Climate and the Space Environment"*, 2008.
7. *R. Pandey, K. Usui et al.*, *Science Advances*, 2016.
8. *M.T. Rosing, D.K. Bird et al.*, *Nature* 464, 744-747, 2010.
9. *C. Sagan and G. Mullen*. *Science*, 177:52-56, 1972.
10. *B. Sportisse*, *Fundamentals in Air Pollution*, 65-66, 2010.
11. *Svensmark, Friis-Christensen*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59:1225-1232, 1997.
12. *J.A. Tarduno, R.D. Cottrell, W.J. Davis et al.*, *Science*, 349:521-524, 2015.
13. *В.В. Братков, Н.И. Овдиенко*, *Геоэкология*, с. 109, 2005.
14. *Б.В. Иванов, О.М. Андреев и др.*, *Проблемы Арктики и Антарктики* №3 (83), 2009.
15. *М.М. Кацова, М.А. Лившиц*, 2014, in: *Cosmic factors of evolution of biosphere and geosphere" Ed. V.N. Obridko*, *Proc. of the Colloquium, Moscow, May 21-23, 2014, V. 1, P. 67-80* (in Russian).
16. *М.И. Мансуров*. *Перспективы выявления и освоения месторождений газа, конденсата и нефти на шельфе морей России*, с. 64-69, 1998.
17. *А.А. Петрукович, А.А. Криволицкий и др.* *Плазменная гелиогеофизика т.2, гл. 8, с. 219-229*, 2008.
18. *А.Ю. Розанов*. *Проблемы происхождения жизни*, 2009.
19. *Фролов В.Т.* *Литология*. Кн. 3, с. 352, 1995.
20. *С.П. Хромов, М.А. Петросяни*. *Метеорология и климатология*, с. 582, 2006.
21. *В.В. Шулейкин*. *Физика моря*, с. 664-680, 1941.

## Chapter 6

### THE FAINT YOUNG SUN PARADOX

© E.G. Khramova

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
Moscow, Troitsk, Russia*

According to astrophysical models, the luminosity of the young Sun had to be by 30% lower than it is today, while according to paleoclimatic data, the Earth surface temperature in Archaea even somewhat exceeded the present-day values. The article analyzes some existing explanations of this discordance, draws attention to a number of unaccounted factors, and suggests a new hypothesis for solving the paradox.

## ***Раздел 2***

# Раннее магнитное поле

*редактор Д.Д. Соколов*



## Глава 7

**РАННЯЯ СТАДИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛИ  
(ИНТЕРВАЛ ПОСЛЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОЛНЦА,  
ФОРМИРОВАНИЕ ЖИДКОГО ЯДРА,  
ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО ЯДРА)**

© Г.В. Печерникова<sup>1,2</sup>, В.Н. Сергеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

Гравитационный коллапс фрагмента межзвездного молекулярного облака привел к образованию Солнца и окружающего его протопланетного диска, состоящего из пыли и газа. Коллапс продолжался  $(1 \div 5) \cdot 10^5$  лет. Возраст солнечной системы (около  $4,57 \cdot 10^9$  лет) определяется возрастными кальциево-алюминиевыми включениями (CAI), которые присутствуют на образцах некоторых метеоритов (хондритов). Осаждение пыли в центральную плоскость протопланетного диска привело к образованию пылевого поддиска, который в результате гравитационной неустойчивости распался на конденсации. В процессе столкновительной эволюции они превратились в плотные планетезимали, из которых образовались планеты. Учет роли крупных тел в эволюции протопланетного роя в области земных планет позволил определить времена формирования массивных тел, позволяющих их раннее дифференцирование за счет короткоживущих нагревов изотопов и воздействия на температуру плавления Глубин. Общее время роста Земли оценивается около 108 лет. Использование геохронометра W–Hf показало, что ядро Земли существует около  $3 \cdot 10^7$  лет с момента образования CAI. Таким образом, геохронометр данных W–Hf указывает на формирование ядра Земли во время его аккреции. Палеомагнитные данные указывают на существование магнитного поля Земли за  $3,5 \cdot 10^9$  лет. Но возраст твердого тела, оцененный тепловым потоком на границе ядра-мантия, составляет  $(0,5 \div 1,7) \cdot 10^9$  лет. Измерения теплопроводности жидкого железа в условиях, которые существуют в ядре Земли, указывают на отсутствие необходимости в твердом ядре существования для поддержки работы геодинамо, хотя измерения электросопротивления дают противоположный результат.

### Введение

Согласно современным представлениям, формирование Солнечной системы началось с гравитационного коллапса фрагмента межзвездного молекулярного облака [1, 2]. Этот процесс привел к образованию Солнца и окружающего его протопланетного диска, состоящего из пыли и газа. По разным оценкам коллапс (стадия протозвезды) занял  $(1 \div 5) \cdot 10^5$  лет [3, 4]. За временную точку отсчета ( $t_0$ ) существования Солнечной системы принимается время образования CAI (кальций-алюминиевых включений) [5], присутствующих в образцах некоторых метеоритов (хондритах). Эти включения сконденсировались из высокотемпературного газа ( $>1300\text{K}$ ), который существовал в протопланетном диске на ранней стадии образования Солнечной системы. CAI являются самым старым твердым веществом, сформировавшимся в Солнечной системе. К настоящему времени по изо-

топным данным получены возрасты САИ из образцов различных метеоритов разными группами исследователей с точностью до нескольких десятых млн лет [6]. Возраст одних из наиболее старых САИ и, следовательно, возраст Солнечной системы составляет  $4568.2_{-0.4}^{+0.2}$  млн лет [7].

Оседание пыли к центральной плоскости протопланетного диска привело к образованию пылевого субдиска, в котором происходило укрупнение пылевых частиц за счет слипания [1]. Вопрос о формировании достаточно крупных планетезималей (размером  $\sim 1$  км и более), способных к дальнейшему укрупнению за счет гравитационных сил, остается в настоящее время до конца нерешенным [8]. Наиболее приемлемым представляется сценарий образования сгущений в результате гравитационной неустойчивости пылевого субдиска с их превращением в плотные планетозимали в процессе столкновительной эволюции [1, 9].

Временные характеристики протекавших в Солнечной системе процессов являются определяющими для оценки возможности влияния одних процессов на другие. Так, образование километровых планетезималей в пределах 2 млн лет от  $t_0$  допускает разогрев, плавление и дифференциацию их недр [10], во многом за счет радиоактивного распада короткоживущих изотопов [11] (прежде всего  $^{26}\text{Al}$ , время полураспада 0.72 млн лет), присутствовавших в протопланетном облаке. Как показывают расчеты, времена образования достаточно крупных планетезималей в зоне планет земной группы укладываются в приведенный выше временной интервал (см., например, [12]).

Кроме знания времен начала и длительности процессов важна также информация о скорости протекания процессов на разных этапах их развития.

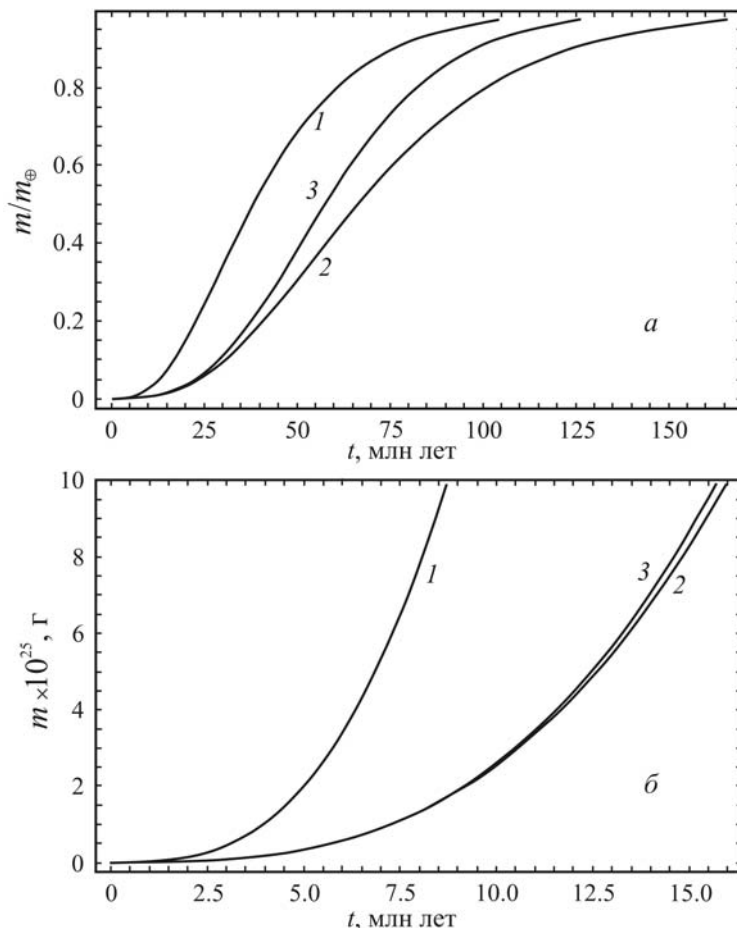
### **Скорость роста Земли**

Скорость роста Земли на ранних стадиях ее формирования является одним из определяющих моментов её дальнейшей эволюции.

Задачи о формировании планет земной группы решались как аналитическими, так и методами численного моделирования в многочисленных работах (см., например, [1, 9, 13, 14]).

В рамках модели твердотельной аккумуляции [1, 9] последовательный учет роли крупных тел в эволюции допланетного роя в области планет земной группы впервые был выполнен в [15]. Результаты работы [15] представлены на рис. 1 в сравнении с результатами предыдущих работ, описывающих рост Земли. На рис. 1 можно видеть, что в модели [15] учет роли крупных тел существенно ускорил набор массы планетой на ранней и основной стадиях роста планеты: массы Марса ( $\approx 0.1 \cdot m_{\oplus}$ ) Земля достигает примерно за 17 млн лет. К 50 млн лет её масса оказывается вдвое большей, чем в ранних моделях. Расчеты показывают [15], что тысячекilометровые тела образуются уже в первые миллионы лет. Однако время роста до

$0.97 \cdot m_{\oplus}$  (т.е. до  $r \approx 0.99 \cdot r_{\oplus}$ ) осталось прежним  $\sim 100$  млн лет, что согласуется с изотопными данными [16]. Численное моделирование формирования планет земной группы дает для Земли время роста от 10 до 100 млн лет [14].

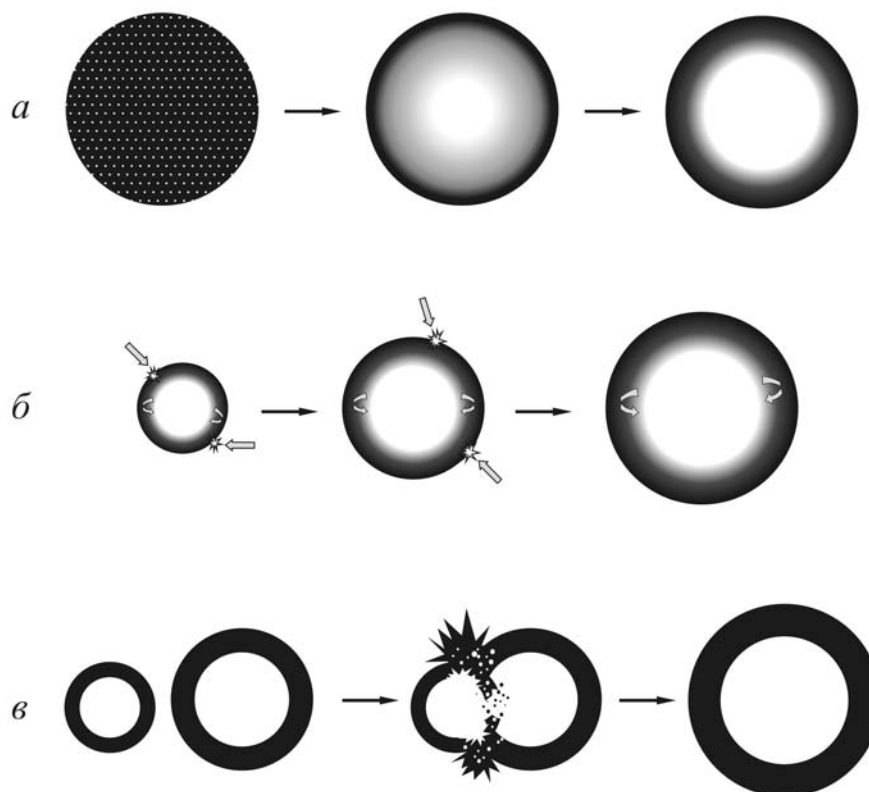


**Рис. 1.** *a* – рост относительной массы Земли; *б* – масса растущей Земли в первые 15 млн лет; кривые 1 – модель, учитывающая роль крупных тел [15], 2 – модель расширяющихся зон питания [1], 3 – модель [9].

Учет роли крупных тел в эволюции допланетного роя в области планет земной группы позволил получить времена формирования массивных тел, допускающие разогрев короткоживущими изотопами (и ударами), плавление и дифференциацию недр. Эти времена согласуются с изотопными данными по Hf–W системе [17]. То, что Земля формировалась, в том числе, из дифференцированных тел, сыграло важную роль при образовании земного ядра.

### Формирование жидкого земного ядра

Формирование ядра Земли могло идти различными путями. На рис. 2. (за основу взят рисунок из [18]) изображены возможные схемы формирования земного ядра.



**Рис. 2.** Схемы формирования ядра Земли: *a* – мгновенное образование ядра полностью сформировавшейся планеты; *б* – непрерывное формирование ядра в течение роста планеты; *в* – смешивание ядро – ядро в течение роста планеты.

Рис. 2*a* иллюстрирует мгновенное образование ядра полностью сформировавшейся планеты. Рис. 2*б* относится к случаю непрерывного формирования ядра в процессе роста планеты. При этом вещество ударника в той или иной степени перемешивается с веществом мантии Земли. Процесс разделения вещества мантии, пополняемого новыми порциями вещества ударников, на металлическую и силикатную фракцию происходит непрерывно. На рис. 2*в* изображена схема, соответствующая случаю смешивания вещества ядра ударника и ядра мишени в течение роста планеты. Для реализации этой схемы критичными являются относительные размеры ударника и мишени. Если ударник значительно меньше мишени, то эта схема не может реализоваться [17].

Наиболее подходящими геохронометрами для определения возраста земного ядра являются Hf–W и U–Pb изотопные системы [18]. Результат использования радиоизотопных методов для определения возраста земного ядра зависит от выбранного сценария формирования ядра, скорости роста Земли и геохимических данных.

Предположение о мгновенном образовании ядра (см. рис. 2*a*) для Земли физически не реалистично, тем не менее, использование изотопных данных по системе Hf–W для определения возраста земного ядра в этом

простейшем случае предоставляет некоторые ограничения на время формирования земного ядра [17]. Использование Hf–W геохронометра для определения возраста земного ядра в этом случае дает возраст ядра Земли около 30 млн лет от  $t_0$  [17, 19]. Это указывает на то, что земное ядро начало формироваться в процессе роста Земли и не могло завершиться раньше выше приведенного времени [17]. Применение U–Pb геохронометра в рамках предположения о мгновенном образовании ядра дает значительно больший возраст формирования ядра – около 120 млн лет от  $t_0$  [19], что также указывает на более длительный, чем 30 млн лет процесс формирования земного ядра.

Время образования ядра Земли при непрерывном его формировании по схеме рис. 2б зависит от ряда параметров, характеризующих этот процесс: как быстро устанавливается равновесие в мантии при поглощении вещества ударника, скорости роста Земли и ряда других. Часто используется предположение о том, что планета поглощает вещество с хондритным отношением Hf/W и изотопным составом W, при этом недавно поглощенный W непрерывно смешивается с W в наружной силикатной части до отделения нового железа и сидерофильных элементов (в том числе W) в ядро. Большинство моделей предполагает экспоненциально убывающую скорость роста планеты и ее ядра [18]. В настоящее время не ясно, в какой степени могло выполняться условие равновесия между привнесенным металлом и мантией [18]. Однако можно утверждать, что расчеты по схеме рис. 2б при условии соблюдения этого равновесия занижают время формирования земного ядра [18].

Приведенные в [17] данные Hf–W геохронометра по времени формирования земного ядра находятся в диапазоне от 30 до более чем 100 млн лет от  $t_0$ . Использование U–Pb геохронометра дает большие времена формирования ядра, чем времена по Hf–W геохронометру при одних и тех же предположениях [18]. В [19] предпринята попытка согласования данных по Hf–W и U–Pb изотопным системам. Противоречие между оценками возраста земного ядра, основанными на Hf–W и U–Pb изотопных системах, может быть разрешено при допущении, что процесс роста ядра протекал длительно, неравномерно во времени и пространстве [19]. Численное моделирование в [19] показало, что в зависимости от принятых предположений, формирование ядра Земли до 90% конечной его массы могло занимать от 0.12 до 2.7 млрд лет при допущении полной неравновесности между силикатным веществом мантии и осаждающейся металлической фазой [19]. Этот результат является максимальной оценкой, и в реальности формирование ядра заняло меньше времени [19].

### **Формирование твердого земного ядра**

Изначально жидкое ядро Земли, по мере его охлаждения и при достижении необходимых значений, определяющих его состояние, параметров,

начало кристаллизоваться [20]. Процесс роста внутреннего твердого ядра продолжается и в настоящее время. Кристаллизация в ядре является источником, поддерживающим работу гео динамо в жидком ядре, генерирующем магнитное поле Земли. Возраст твердого ядра, оцененный по современному тепловому потоку на границе ядро-мантия, составляет от 0.5 до 1.7 млрд лет [20, 21]. При определении возраста твердого ядра Земли помимо теоретических оценок важную информацию предоставляют палеомагнитные данные и лабораторные исследования [22].

Палеомагнитные данные указывают на устойчивое существование магнитного поля Земли, по крайней мере, последние 3.5 млрд лет [20]. Получены свидетельства о существовании магнитного поля 4.2 млрд лет назад [23]. По изменению характеристик палеомагнитных записей сделан вывод о начале кристаллизации твердого ядра Земли в интервале от 1 до 1.5 млрд лет назад [24].

Лабораторные исследования при условиях, существующих в ядре Земли, пока дают противоречивые результаты [25]. Измерения теплопроводности жидкого железа при условиях, существующих в ядре Земли, указывают на отсутствие необходимости существования твердого ядра для поддержания работы гео динамо [26]. В то же время измерения удельного электрического сопротивления железа при тех же условиях дают противоположный результат [27].

### **Заключение**

В заключение можно отметить следующие моменты, касающиеся уровня знаний временных рамок ранней стадии формирования Земли и ее ядра.

1. Формирование Земли в пределах около 100 млн лет с быстрым набором массы на начальной и основной стадиях роста достаточно надежно установлено на основании динамических моделей и подтверждено изотопными данными. Среди тел, из которых Земля сформировалась, были дифференцированные тела.

2. Время, за которое сформировалось земное ядро, определяемое по изотопным данным, зависит от выбранной модели образования ядра, скорости роста Земли, степени равновесия между силикатным веществом мантии и осаждающейся металлической фазой, геохимических параметров. По оценкам оно составляет от 30 до более чем 100 млн лет.

3. Проблема определения возраста твердого ядра Земли пока не имеет удовлетворительного решения.

### **Литература**

1. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука. 1990, 296 с.

2. *Chambers J.E.* Planet Formation / Treatise on Geochemistry 2nd Ed., Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier, 2014, V 2. Planets, Asteroids, Comets and the Solar System P. 55–72.
3. *Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: Едиториал УРСС. 2004, 264 с.
4. *Кусков О.Л. и др.* Системы Юпитера и Сатурна. Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М: ЛКИ. 2009, 576 с.
5. *MacPherson G.J.* Calcium-Aluminum-Rich Inclusions in Chondritic Meteorites / Treatise on Geochemistry 2nd Edition, Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier, 2014, V. 1: Meteorites and Cosmochemical Processes. P. 139–179.
6. *Wadhwa M.* Solar System Time Scales from Long-Lived Radioisotopes in Meteorites and Planetary Materials / Treatise on Geochemistry 2nd Ed., Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier, 2014, V. 1: Meteorites and Cosmochemical Processes. P. 397–418.
7. *Bouvier A., Wadhwa M.* The Age of the Solar System redefined by the oldest Pb-Pb age of a meteoritic inclusion // Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 637–641.
8. *Зиглина И.Н., Макалкин А.Б.* Гравитационная неустойчивость в пылевом слое протопланетного диска: взаимодействие твердых частиц с турбулентным газом в слое // Астрономический вестник. 2016. Т. 50. № 6. С. 431–449.
9. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
10. *Gail H.-P. et al.* Early Thermal Evolution of Planetesimals and its Impact on Processing and Dating of Meteoritic Material / Protostars and Planets VI. Eds. H. Beuther et al. Tucson: Univ. of Arizona Press, 2014. P. 571–594.
11. *Davis A.M., McKeegan K.D.* Short-Lived Radionuclides and Early Solar System Chronology / Treatise on Geochemistry 2nd Ed., Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier, 2014, V. 1: Meteorites and Cosmochemical Processes. P. 361–395.
12. *Печерникова Г.В., Витязев А.В., Сергеев В.Н.* Раннее формирование кометных тел и родительских тел метеоритов // Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 8. М.: ГЕОС, 2016. С. 170-177.
13. *Wetherill G.W.* Accumulation of the terrestrial planets and implications concerning lunar origin / Origin of the Moon. Eds. Hartmann W.K, Phillips R.J., Taylor G.J. 1986. Houston, TX: Lunar Planetary Institute. P. 519–550.
14. *Rubie D.C., Nimmo F., Melosh H.J.* Formation of the Earth's Core / Treatise on Geophysics 2nd Ed., Editors-in-Chief: G. Schubert. Elsevier, 2015. V. 9. Evolution of the Earth. P. 43–79.
15. *Печерникова Г.В.* Время роста Земли // ДАН. 2005. Т. 401. № 3. С. 391–394.
16. *Allegre C.J., Manhès G., Gopel C.* The age of the Earth // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. No. 8. P. 1445–1456.
17. *Kleine T. et al.* Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets // Geochim. and Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. № 17. P. 5150–5188.
18. *Halliday A.N., Wood B.J.* The Composition and Major Reservoirs of the Earth Around the Time of the Moon-Forming Giant Impact / Treatise on Geophysics 2nd Ed., Editors-in-Chief: G. Schubert. Elsevier, 2015. V. 9. Evolution of the Earth. P. 11–42.
19. *Костицын Ю.А.* Возраст земного ядра по изотопным данным: согласование Hf–W и U–Pb систем // Геохимия. 2012. № 6. С. 531–554.
20. *Nimmo F.* Thermal and Compositional Evolution of the Core / Treatise on Geophysics 2nd Ed., Editors-in-Chief: G. Schubert. Elsevier, 2015. V. 9. Evolution of the Earth. P. 201–219.
21. *Labrosse S.* Thermal evolution of the core with a high thermal conductivity // Phys. Earth Planet. In. 2015. V. 247. P. 36–55.

22. *Smirnov A.V. et al.* Paleointensity, core thermal conductivity and the unknown age of the inner core // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 205. P. 1190–1195.
23. *Tarduno A.J. et al.* A Hadean to Paleoarchean geodynamo recorded by single zircon crystals // *Sciences.* 2015. V. 349. P. 521–524.
24. *Biggin A. et al.* Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation // *Nature.* 2015. V. 526. P. 245–248.
25. *Dobson D.* Earth's core problem // *Nature.* 2016. V. 534. P. 45.
26. *Konopkova Z. et al.* Direct measurement of thermal conductivity in solid iron at planetary core conditions // *Nature.* 2016. V. 534. P. 99–101.
27. *Ohta K. et al.* Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions // *Nature.* 2016. V. 534. P. 95–98.

## *Chapter 7*

### **EARLY STAGE OF ORIGIN OF EARTH (INTERVAL AFTER EMERGENCE OF SUN, FORMATION OF LIQUID CORE, FORMATION OF SOLID CORE)**

© **G.V. Pechernikova<sup>1,2</sup>, V.N. Sergeev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Geospheres Dynamics of RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Engineering Physics Institute Moscow, Russia*

Gravitational collapse of interstellar molecular cloud fragment has led to the formation of the Sun and its surrounding protoplanetary disk, consisting of dust and gas. The collapse continued  $(1\div 5)\cdot 10^5$  years. Age of solar system (about  $4.57\cdot 10^9$  years) determine by age calcium-aluminum inclusions (CAI) which are present at samples of some meteorites (chondrites). Subsidence of dust to the central plane of a protoplanetary disk has led to formation of a dust subdisk which as a result of gravitational instability has broken up to condensations. In the process of collisional evolution they turned into dense planetesimals from which the planets formed. The accounting of a role of large bodies in evolution of a protoplanetary swarm in the field of terrestrial planets has allowed to define times of formation of the massive bodies permitting their early differentiation at the expense of short-lived isotopes heating and impacts to the melting temperature of the depths. The total time of Earth's growth is estimated about  $10^8$  years. Using W–Hf geochronometer showed that the core of the Earth has existed for about  $3\cdot 10^7$  years since the formation of the CAI. Thus data W–Hf geochronometer point to the formation of the Earth's core during its accretion. The paleomagnetic data indicate the existence of Earth's magnetic field past  $3.5\cdot 10^9$  years. But the age of the solid core, estimated by heat flow at the core-mantle boundary is  $(0.5\div 1.7)\cdot 10^9$  years. Measurements of the thermal conductivity of liquid iron under the conditions that exist in the Earth's core, indicate the absence of the need for a solid core of existence to support the work geodynamo, although electrical resistivity measurements yield the opposite result.

## *Глава 8*

# **ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАБОТУ ДИНАМО**

© Д.Д. Соколов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн*

*им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

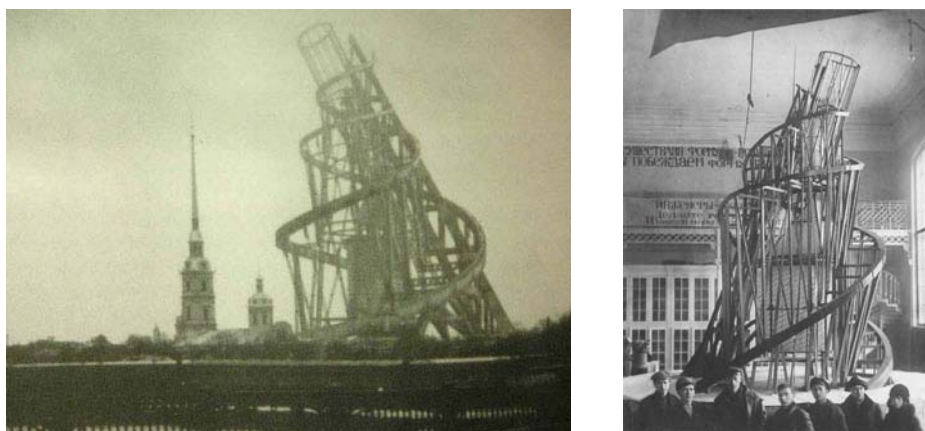
Считается, что магнитное поле Земли возбуждается механизмом геодинамо. Основные физические принципы, на которых основан этот механизм, те же, что и для солнечного, звездных и галактических динамо. Отличительная особенность геодинамо в том, что мы очень мало знаем о течениях в той оболочке Земли, в которой предполагается действие геодинамо.

Основная трудность в построении моделей геодинамо связана с необходимостью восстановления тех свойств потоков, которые определяют работу геодинамо. Тем не менее, некоторые ограничения на работу геодинамо можно указать независимо от подобных реконструкций. В частности, мы показываем, что образование значительного магнитного поля Земли должно происходить быстро (по геологическим масштабам) после образования жидкой проводящей оболочки внутри Земли, с которой и связывается действие геодинамо. Наша аргументация основана на общих свойствах сферических динамо, аналогией с эволюцией магнитного поля Солнца, известной из астрономических наблюдений, а также на известных чертах эволюции геомагнитного поля.

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 (литература по динамо огромна, ссылки на соответствующие работы можно найти, скажем, по обзору [1]). При этом важно, что этот процесс определяется не только самыми грубыми свойствами течения (проводимостью среды, амплитудой скорости, ее масштабом и т.д.), но и более его тонкими свойствами. Дело в том, что самое простое течение – равномерное и прямолинейное движение и твердотельное вращение – вообще не могут, в силу симметрий уравнений Максвелла, усиливать магнитное поле, а одно дифференциальное (т.е. не твердотельное) вращение может приводить к кратковременному усилению магнитного поля, которое затем быстро сменяется его затуханием. Для длительного усиления и последующего поддержания магнитного поля Земли необходимо действие некоторого дополнительного фактора, в роли которого естественно видеть зеркально-асимметричную конвекцию в жидком внешнем ядре Земли.

То, что течения жидкости в различных жидких оболочках Земли естественно считать зеркально асимметричными, составляет содержание из-

вестного в географии закона Бэра, поэтому общая концепция работы геодинамо является общепризнанной. В рамках этой концепции для происхождения магнитного поля, более-менее похожего на магнитное поле Земли, необходимо наличие жидкой проводящей оболочки, наличие в ней конвекции и дифференциального вращения тела. Речь идет о магнитном поле земного типа потому, что нужно отмежеваться от возможности происхождения физически неродственных магнитных полей, скажем, поля, возникающего вокруг тела при движении его через замагниченную среду, либо ферромагнетизма твердых оболочек. Подобные явления встречаются и на Земле, но играют, как считается, второстепенную роль, по сравнению с работой динамо.



**Рис. 1.** Проиллюстрировать ансамбль вихрей с преобладанием определенной спиральности не просто – человеческий глаз плохо различает небольшое преобладание элементов одной спиральности. Некоторое представление о подобном ансамбле можно получить, рассматривая коллаж различных изображений проекта памятника Коминтерну, сделанный Татлиным. Сам по себе проект предполагал строительство башни в виде спирали, направление на которой фиксировано тем, что витки спирали постепенно сжимаются. Если считать это направление положительным, то спирали на рисунках правовращающиеся, хотя в соответствии с замыслом памятника естественнее было бы сделать их левовращающимися. Для того чтобы подобная среда была похожа на реальную, нужно себе представить как минимум сотню таких фотографий, повернутых на разнообразные углы, причем правовращающихся моделей, скажем, 55, а левовращающихся 45.

Изображения взяты с сайта ARCHITIME.RU  
([http://www.architime.ru/specarch/tatlin/tatlin\\_tower.htm](http://www.architime.ru/specarch/tatlin/tatlin_tower.htm)).

Уже эти очень общие соображения помогают многое понять в природе магнетизма планет Солнечной системы. В самом деле, отсутствие магнитного поля, сопоставимого с геомагнитным, у Марса и Луны естественно связывать с отсутствием у них конвективных проводящих оболочек. Имеющиеся у них остатки магнитного поля связывать с наличием таких оболочек в прошлом. Отсутствие магнитного поля земного типа у Венеры естественно связать с ее медленным вращением. Естественно, что все эти общие соображения требуют разнообразных уточнений, которые произво-

дятся при более детальном изучении природы остаточных магнитных полей упомянутых небесных тел.

Построение реалистических моделей геодинамо (как и динамо в других небесных телах) хотя и является трудной задачей, однако уже почти два десятилетия посильно для современной науки (рубежом здесь явилась работа [2]). Проблема состоит в том, что именно заложено в эти модели. Для моделей генерации магнитного поля в Солнце и галактиках обычно распределение угловой скорости и, по возможности, другие характеристики течения считаются известными или, во всяком случае, авторы моделей добиваются совпадения этих параметров с имеющимися данными. При этом мы далеко не всегда хорошо понимаем, почему это вращение такое, каким оно оказывается по наблюдательным данным. Например, кривые вращения спиральных галактик очень отличаются от того, что естественно ожидать по законам Кеплера. Эти т.н. плоские кривые вращения, видимо, возникают потому, что галактики окружены значительным гало из невидимого для нас вещества, о свойствах которого мы можем только догадываться. Именно этот факт исторически послужил одним из источников проблемы темной материи в космологии (см. напр. [3]). Тем не менее, общепринято разделять проблемы происхождения магнитных полей спиральных галактик и происхождения их кривых вращения.

В геодинамо дело обстоит существенно иначе. Нет особых сомнений в том, что распределение движений во внешнем ядре Земли определяется традиционной физикой и не требует привлечения таких необычных факторов, как темная материя. Однако у нас очень мало наблюдательных данных о том, какое это движение на самом деле, поэтому реально свойства этих движений в моделях геодинамо определяются не всегда явными предположениями, сделанными при построении соответствующих моделей. Представление о том, что мы можем предсказывать детали течений во внешнем ядре Земли опираясь только на интегральные параметры Земли как планеты, означает, что мы готовы предсказывать течения во всех планетах земного типа. Это представление хотя и заманчиво, но не кажется аргументом достаточно убедительным.

Тем более остро стоит проблема определения параметров течений во внешнем ядре Земли в удаленные от нас по времени геологические эпохи. Поэтому кажется важным обсудить, что мы можем сказать о времени возникновения магнитного поля Земли, опираясь на возможно более общие соображения о работе механизма динамо. Это, конечно, не компенсирует отсутствия знаний о течениях во внешнем ядре земли в удаленные от нас по времени эпохи, но покажет, от чего мы должны отказаться, если захотим пересмотреть такую консервативную оценку.

Динамо представляет собой пример неустойчивости. Скорость роста магнитного поля и период его циклических изменений возникают в динамо как две стороны одной величины - комплексного собственного числа. Скорость роста – его действительная часть, а период цикла связан с мнимой

частью собственного числа динамо. Очень трудно построить такую модель динамо, в которой обе эти характеристики были бы ненулевые, но различались бы на порядки величин. Естественно, экспоненциальный рост магнитного поля продолжается лишь короткое время, а потом ситуация так или иначе стабилизируется. Из периодических изменений магнитного поля получается квазипериодическая цикличность, а экспоненциальный рост прекращается. Поэтому мы практически не можем прямо измерить скорость экспоненциального роста магнитного поля на Солнце, однако длительность солнечного цикла дает уверенную оценку с точностью до множителя порядка единицы для этой скорости.

Отметим, что память о скорости роста магнитного поля на стадии экспоненциального роста можно увидеть и в том, как меняется интенсивность солнечных циклов. Например, в XVII – начале XVIII вв. на Солнце по тем или иным причинам случился минимум циклической активности – т.н. минимум Маундера, во время которого число солнечных пятен существенно (как минимум, в разы) упало по сравнению с современным числом пятен. (Обзор современных сведений о минимуме Маундера см., напр., в [4].) Детали того, что тогда произошло с Солнцем в это время, в силу удаленности от нас по времени допускают различные интерпретации, но ясно, что восстановление циклической активности на том, что можно назвать средним ее уровнем, произошло за несколько циклов. Поэтому естественно думать, что характерное время роста магнитного поля тогда, когда динамо еще не было ограничено нелинейными эффектами, было сопоставимо (может быть, чуть меньше) с длиной цикла солнечной активности. Примерно так же соотносятся действительная и мнимая части собственного числа в линейных задачах солнечного динамо.

Ситуация с геомагнитным полем более сложная. Согласно палеомагнитным данным [5], оно не обнаруживает циклических (квазипериодических) изменений, однако время от времени на Земле случаются инверсии геомагнитного поля, в результате которых направление магнитного диполя меняется на противоположное.

Последовательность инверсий далека от строго периодической. В ней, быть может [6], и видны какие-то следы периодичности, но она больше похожа на случайную последовательность [7]. Временные расстояния между соседними инверсиями могут быть и очень длинные (их называют суперхронами), но бывают и достаточно короткими по геологическим временам, во всяком случае могут составлять порядка 1 млн лет. Еще короче время самой инверсии – она происходит по геологическим масштабам практически мгновенно, за тысячи лет. Время диффузии магнитного поля через внешнее ядро оценивается как примерно 10 тысяч лет. Обычно это время порядка скорости роста магнитного поля в задаче динамо. Выглядело бы очень странно, если бы характерное время роста магнитного поля было при этом было существенно больше 1 млн лет.

В принципе, свойства шкалы инверсий могут меняться в ходе геологической истории Земли. Естественно, наши знания о строении этой шкалы драматически убывают при переходе от недавних геологических эпох к древним, однако не видно, чтобы и в древности не случались эпизоды частных переполусовок геомагнитного диполя. Поэтому с определенной осторожностью можно предполагать, что скорость роста магнитного поля Земли никак не меньше 1 млн лет. Конечно, это лишь оценка по порядку величины.

Для оценки времени между образованием жидкого внешнего ядра Земли и образованием магнитного поля, сопоставимого с современным, строго говоря, не достаточно знать скорость роста магнитного поля. В принципе, нужно еще знать величину начального магнитного поля.

Оценка начального магнитного поля нужна гораздо менее точная, чем оценка скорости роста, поскольку экспонента – очень быстро растущая функция. Поэтому заметный разброс в оценке начального магнитного поля не очень сильно сказывается на оценке того времени, когда оно достигло современных значений. С другой стороны, наши знания об этой отдаленной эпохе эволюции Земли гораздо хуже, чем о ее современном состоянии. Поэтому мы заинтересованы в возможно менее модельно зависимых аргументах.

При оценке затравочного для работы динамо магнитного поля мы можем опереться на следующий наблюдательный факт. В мире галактик и звезд, т.е. в том мире, в котором образовывалась Земля, магнетизм – типичное явление (см. напр. [8]) . При этом плотность энергии магнитного поля близка к плотности энергии турбулентных движений среды (конечно, энергия общего вращения гораздо больше).

Как правило, работа динамо в индивидуальном небесном теле сводится не к увеличению напряженности магнитного поля на много порядков, а в сравнительно небольшом (скажем, в тысячу раз) росте этой напряженности и к формированию структуры крупномасштабного магнитного поля.

Происхождение затравочных магнитных полей для работы динамо может быть различно, так что конкретный сценарий их образования должен зависеть от наших представлений об образовании Земли. В частности [9], можно связывать эти поля непосредственно с процессами в ранней Вселенной и возникновением барионного вещества как такового.

В последующем формировании затравочного магнитного поля могут принимать участие химические, т.н. батарейные механизмы, а также работа мелкомасштабного динамо, не связанного с вращением [10]. Так или иначе, в затравочном магнитном поле обычно не бывает недостатка.

Итак, на уровне современных представлений о происхождении магнитных полей небесных тел естественно ожидать, что магнитное поле Земли возникло через геологически короткое время (не более 10 млн. лет) после образования жидкой проводящей оболочки Земли.

Работа поддержана проектом РНФ 16-17-10097.

### Литература

1. Д.Д. Соколов, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик. Динамо на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту, *Успехи физ. наук*, 2014, т. 184, N 3, 313–335.
2. G.A. Glatzmaier, P.H. Roberts. Rotation and magnetism of Earth's inner core, *Science*, 274, 1887–1892, 1996.
3. В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева. Темная материя от начальных условий до образования структуры Вселенной, *Успехи физ. наук*, 2016, т. 177, N9, с. 1023–1028.
4. I.G. Usoskin, R. Arlt, E. Asvestari, E. Hawkins, Ed, M. Käpylä, G. Kovaltsov, N. Krivova, M. Lockwood, K. Mursula, J. O'Reilly, M. Owens, C.J. Scott, D.D. Sokoloff, S.K. Solanki, W. Soon, J.M. Vaquero. The Maunder minimum (1645–1715) was indeed a Grand minimum: A reassessment of multiple datasets, *Astron. Astrophys.*, 581, **A95**, 2015.
5. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. *The geologic time scale*, Elsevier, Amsterdam, 2012.
6. Д.Д. Соколов. А.С. Шибалова. Периодичности в шкале геомагнитной полярности, *Физика Земли*, № 5, 156–159, 2015.
7. И.Ю. Калашиников, Д.Д. Соколов, В.М. Четкин. *Физика Земли*, № 3, 68–77, 2015.
8. Д.Д. Соколов. Самые большие магниты, *Природа*, № 7, 3–11, 2015.
9. Semikoz V., Sokoloff D., Valle J.W.F. Is the baryon asymmetry of the Universe related to galactic magnetic fields? *Phys. Rev. D.*, 80, 083510, 2009.
10. R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, D. Sokoloff. Galactic magnetism: Recent development and perspectives, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 34, 155–206, 1996.

## Chapter 8

### ORIGIN OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD AND PHYSICAL CONSTRAINS FOR THE DYNAMO ACTION

© D.D. Sokoloff

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*  
*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS*  
*Moscow, Troitsk, Russia*  
*Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia*

The Earth's magnetic field is believed to be generated by geomagnetic dynamo action. Basic physical principles of geodynamo are the same as that one for solar, stellar and galactic dynamos. An important feature of geodynamo is however the fact that we know very little about the flows in the region of dynamo action. The main problem for dynamo modeling is associated with reconstruction with properties of the flow important for geodynamo action. Nevertheless, some constraints for geodynamo action can be obtained independently of this reconstruction. In particular, we argue here that the formation of substantial magnetic field have to occur rather rapid after the liquid conductive shell of the Earth has been formatted. Our argumentation is based on general features of spherical dynamos and comparison of solar magnetic field evolution known from astronomical observations and the Earth's magnetic field evolution.

## **Глава 9**

# **НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ, МОДЕЛЬНЫЕ И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ОСНОВЫ ЗЕМНОГО И ЛУННОГО ГИДРОМАГНЕТИЗМА**

© **С.В. Старченко**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия*

Гидромагнитное динамо возможно лишь при достаточно мощной конвекции, которая в ядре Земли и древней Луны, вероятно, нетепловая. Получены законы масштабирования, связывающие мощность конвекции с типичными величинами скорости, магнитного поля и их размерами, которые увязываются с наблюдаемыми и более древними магнитными вариациями.

Поддерживающая геодинамо композиционная конвекция Брагинского [1963] при кристаллизации тяжелой фракции из жидкого на твердое ядро началась менее миллиарда лет назад. Более древнее поле поддерживала конвекция другого типа. Известные механизмы осуществления такой конвекции отличаются сценариями магнитной эволюции, что может помочь отождествлению истинного механизма через палеомагнитные реконструкции. Аналогично могло генерироваться древнее поле Луны, величину которого оценивают в несколько раз больше геомагнитного, что возможно при особом типе конвекции и/или с сильным приливным воздействием Земли.

### **1. Введение**

Геомагнитное поле непосредственно и систематически измеряется фактически уже несколько столетий с тех времен, когда вооруженные компасом мореплаватели начали вести судовые журналы. Так в наиболее общепринятой исторической модели *gufm1* [1] используются магнитные склонения и наклонения из судовых журналов с 1590 года (существуют и более поздние документы). Абсолютную величину и компоненты поля систематически начали измерять с 1832 года, когда великий Гаусс создал первую магнитную обсерваторию в Геттингене. С того времени и до сих пор преимущественно применяется открытый Гауссом сферический гармонический анализ. Последний свидетельствует о том, что почти 90% (по мощности) наблюдаемого у поверхности Земли поля составляет осевой диполь, который может существенно измениться лишь на интервалах от тысячи лет. Наиболее точные спутниковые наблюдения покрывают всего несколько десятилетий, обсерваторские – 185 лет, а исторические – менее 600. На временах более тысячи лет работают только археомагнитные [2] и палеомагнитные [3] реконструкции, которые, к сожалению, отличаются несравненно меньшими информационными объемами (килобайты по сравнению с терабайтами спутниковых и обсерваторских данных), а еще печальнее – не лучше чем удовлетворительными пространственно-временными разрешениями и достоверностями. Тут на помощь неожиданно пришли численные модели геодинамо, которые до конца прошлого века представ-

лялись совершенно нереалистическими. Ситуация кардинально изменилась с появлением в 1995 году работы Глатзмайера и Робертса [4], которым при далеких от геодинамо ключевых параметрах удалось построить весьма похожую на геодинамо численную модель действующую из первых принципов. К настоящему времени созданы сотни численных моделей такого типа [5–9]. Они широко используются при моделировании/прогнозировании динамики и морфологии как непосредственно наблюдаемого, так и реконструируемого магнитного поля Земли и других планет. Вместе с тем, относительно строго из анализа всего доступного множества таких моделей доказаны лишь законы масштабирования, которые связывают мощность конвективного переноса с типичными величинами скорости, магнитного поля и размера [5, 10]. Поэтому значительная часть этой работы посвящена этому аспекту.

В следующей части 2 этой главы для Земли обсуждаются известные законы масштабирования, связывающие мощность конвективного переноса с типичными величинами скорости, магнитного поля и размера, которые увязываются с наблюдаемыми и более древними магнитными вариациями. При этом усредненная величина генерируемого магнитного поля пропорциональна корню третьей степени из удельной мощности конвекции, что задает одну из основ части 3 этой главы. В этой третьей части рассматриваются всевозможные сценарии осуществления энергетической поддержки конвективного динамо от момента формирования Земли и Луны до современности. Известные механизмы осуществления соответствующей конвекции отличаются сценариями магнитной эволюции, что может помочь отождествлению истинного механизма через численные модели и/или палеомагнитные реконструкции.

## **2. Дипольные вариации, вихревое поле и законы масштабирования**

Рассмотрим магнитное  $\mathbf{B}$  и электрическое  $\mathbf{E}$  поля в ядре планеты  $W$  с границей  $G$ . Следуя [11], проинтегрируем по всему этому объему закон Фарадея (слева далее) и, применяя интегральную теорему, получим:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \int_W \mathbf{B} d^3 r = - \int_G \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E} d^2 r . \quad (1)$$

Подставим в (1) поле  $\mathbf{E}$  из закона Ома (2) для плотности электрического тока  $\mathbf{J}$  в движущейся со скоростью  $\mathbf{u}$  среде при проводимости  $\sigma$ :

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu_0 = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) . \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует [11–13] (коэффициент магнитной диффузии  $\lambda = 1/(\mu_0 \sigma)$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \mathbf{B} d^3 r = \int_G \hat{\mathbf{r}} \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B} - \lambda \nabla \times \mathbf{B}) d^2 r . \quad (3)$$

Используя левое равенство из (2) преобразуем (подробнее [12] с. 173) объемный интеграл из (3) в дипольный магнитный момент  $\mathbf{m}$  планеты:

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int_W \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{J} d^3r = \frac{3}{2\mu_0} \int_W \mathbf{B} d^3r. \quad (4)$$

Объем  $W$  жестко ограничен мантией и выполняется условие прилипания  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$  на  $G$ . В системе координат связанной с мантией из (3–4) получим связь вариаций  $\mathbf{m}$  с диффузией  $\mathbf{B}$  непосредственно под границей ядро-мантия  $G$ :

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\frac{3\lambda}{2\mu_0} \int_G \hat{\mathbf{r}} \times \nabla \times \mathbf{B} d^2r. \quad (5)$$

Дипольный момент  $\mathbf{m}$  выражается через стандартные коэффициенты Гаусса ( $g_1^1, h_1^1, g_1^0$ ), декартовы координаты ( $x, y, z$ ) и радиус планеты  $R$ :

$$\mathbf{m} = \frac{4\pi}{\mu_0} R^3 (g_1^1 \hat{\mathbf{x}} + h_1^1 \hat{\mathbf{y}} + g_1^0 \hat{\mathbf{z}}). \quad (6)$$

Разобьем  $\mathbf{B} = \mathbf{O} + \mathbf{V}$  на наблюдаемую потенциальную  $\mathbf{O}$  ( $\nabla \times \mathbf{O} = \mathbf{0}$ ) и скрытую в ядре вихревую  $\mathbf{V}$  ( $\nabla \times \mathbf{V} \neq \mathbf{0}$ ) части. Выразим из (5–6) усредненные радиальные производные вихревого поля ( $X, Y, Z$ ) через вариации компонент геомагнитного диполя ( $R_c$  – радиус ядра):

$$X \equiv \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin \theta \left( \cos \theta \cos \varphi \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \sin \varphi \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \right) \frac{d\theta d\varphi}{4\pi} = \frac{2R^3}{3\lambda R_c^2} \frac{dg_1^1}{dt}, \quad (7)$$

$$Y \equiv \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin \theta \left( \cos \theta \sin \varphi \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \cos \varphi \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \right) \frac{d\theta d\varphi}{4\pi} = \frac{2R^3}{3\lambda R_c^2} \frac{dh_1^1}{dt}, \quad (8)$$

$$Z \equiv \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \frac{d\theta d\varphi}{4\pi} = -\frac{2R^3}{3\lambda R_c^2} \frac{dg_1^0}{dt}. \quad (9)$$

Используем для определения  $X, Y, Z$  модель IGRF [14], а значение  $\lambda = 0.8$  м<sup>2</sup>/сек возьмем из [15], где его определили исходя из экспериментов и первых принципов. Отметим, что до появления в 2012г. первых работ [16] по такому определению, использовали в несколько раз большие значения  $\lambda$ . Результирующие производные вихревого поля представлены на рис. 1.

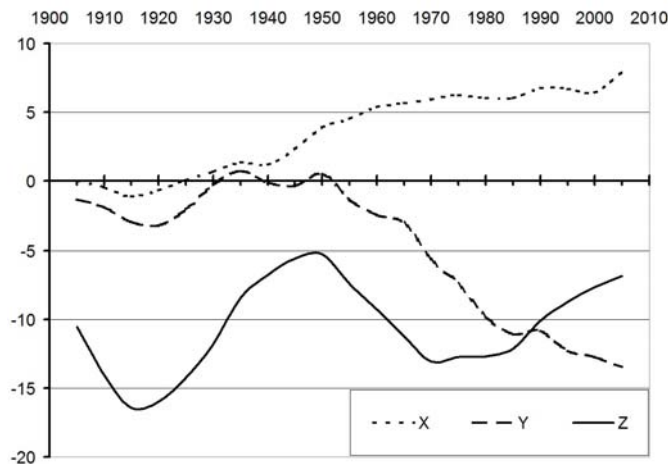
Среднеквадратичную производную  $S$  оценим следующим образом:

$$S \equiv \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{21} \frac{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}{21}} = 4.6 \text{ нТл/м}. \quad (10)$$

Здесь по  $i$  перебираются каждые 5 лет значения производных из (7–9) и рис. 1. Соответственно магнитный масштаб геодинамо в верхней части ядра ( $D = 262$  мкТл – среднеквадратичная величина диполя):

$$d = D/S = 57 \text{ км}. \quad (11)$$

Как и следовало ожидать, из-за интенсивного процесса геодинamo [10; 17–20] масштаб связанного с диполем вихревого поля  $d$  гораздо меньше масштаба наблюдаемого поля, который порядка  $R_c/3=10^3$  км. Можно построить и трехпараметрическую модель вихревого поля, детали в [20], которая дает поле, в несколько раз превышающее  $D$  уже на глубине порядка  $d$ . Это не только прекрасно согласуется с независимыми оценками из [4–5, 10; 17–20], но и позволяет использовать (11) во всем жидком ядре.



**Рис. 1.** Эволюция производных из (7–9) в нТл/м.

При использовании (7–9), оценке (10) соответствует усредненная вариация геодиполя порядка 1 мкТ за столетие, что согласуется с археомагнитными [21] и палеомагнитными [22] данными, но требует дальнейшей работы по уточнению способов усреднения. Если разделить  $D$  на величину этой вариации, то получим около 30-ти тысяч лет. Это замечательным образом близко к периоду свободного затухания диполя [11–13] и прямо из наблюдений свидетельствует о генерирующем динамо.

Согласно [5, 10, 18–20] энергетику геодинamo определяет удельная мощность конвективного переноса  $F$  через чрезвычайно малое число

$$\delta = F / (R_c^2 \Omega^3). \tag{12}$$

Здесь  $\Omega$  – угловая скорость вращения, которая, как и радиус ядра  $R_c$ , точно известны для Земли и хорошо определяется в других планетах. Напротив ключевая для динамо величина  $F$  известна с огромной неопределенностью. Поэтому заманчиво определить ее и соответствующие энергозависимые параметры геодинamo из наблюдений на основе усредненного масштаба  $d$  из (11). Для этого используем законы масштабирования из [5, 10]:

$$h = \delta^{1/5} R_c, \quad u = \delta^{2/5} R_c \Omega, \quad B = \delta^{1/3} \sqrt{\rho \mu_0} R_c \Omega, \quad d = \delta^{2/15} R_c, \quad s = \delta^{2/15}. \tag{13}$$

Здесь  $\rho$  – известная плотность. Наибольший интерес в (13) представляет соотношение для магнитного масштаба  $d$ , которое позволяет сделать наблюдательную оценку  $F$ , исходя из его определения (12), по формуле:

$$F = R_c^2 \Omega^3 (d / R_c)^{15/2}. \quad (14)$$

Окончательно, на основе (11, 13–14), оценим удельную мощность конвекции  $F$ , “вращательное” число Рэлея  $\delta$ , магнитное поле  $B$ , скорость течений  $u$ , гидродинамический масштаб  $h$  и синус  $s$  (угла между  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{B}$ ):

$$F=0.19 \text{ пВт/кг}, \delta = 4.0 \cdot 10^{-14}, B=1.0 \text{ мТл}, u=1.1 \text{ мм/сек}, h=7.3 \text{ км}, s=0.016. \quad (15)$$

### 3. Энергетическая и магнитная эволюция ядра

Перепишем закон масштабирования (13) для среднего магнитного поля  $B$  в его изначальном впечатляюще простом размерном виде из [5]:

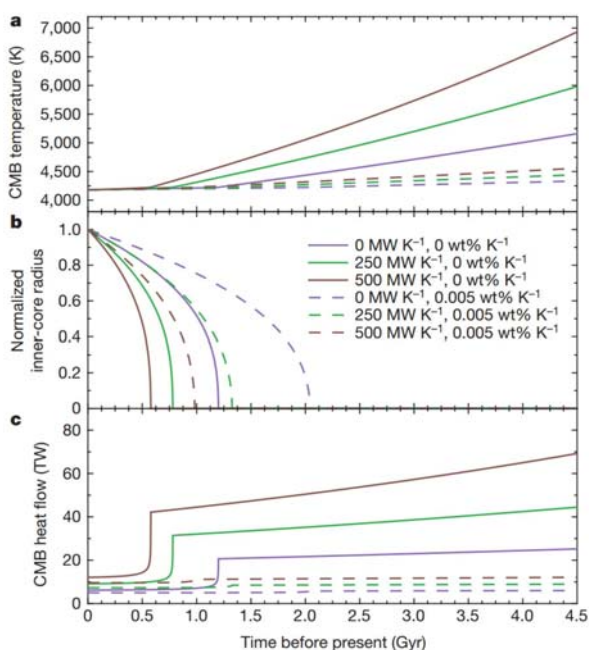
$$B = \sqrt{\rho \mu_0} (FR_c)^{1/3}. \quad (16)$$

Величина поля пропорциональна третьей степени от мощности конвекции  $F$ , что ведет к относительно малым глобальным вариациям среднего поля в ядре планеты. Суммарную мощность конвекции можно оценить, умножая  $F$  на массу ядра  $M$ . Исходя из (15), получим, что для поддержания современного геодинамо требуется  $FM = 0.4$  ТВт. В два-три раза большую мощность может обеспечить композиционная конвекция Брагинского [17, 23], которая происходит в результате кристаллизации в  $F$ -слое тяжелой жидкой фракции на твердое ядро и сопутствующего всплывания отторгнутой легкой фракции. Тепловые эффекты при этом вероятно стабилизируют конвекцию, поскольку адиабатический тепловой поток из ядра составляет около 12–20 ТВт [15, 16], что, по-видимому, превышает суммарный тепловой поток на границе ядро–мантия [15–18, 25]. В результате современное тепловое противодействие конвекции может «съесть» избыточную композиционную мощность и «оставить» геодинамо «лишь» 0.4 ТВт. Еще одно следствие такого относительно большого теплового потока из ядра – ограничение возраста твердого ядра величиной около одного миллиарда лет [15]. Позже динамо Брагинского уже не работало и для поддержания регистрируемых палеомагнитными методами ~1–4.2 миллиарда лет назад [26, 27, 28] древнейших полей требовалась композиционная конвекция другого типа. Тепловые же эффекты имеют настолько низкий КПД [17], что представляется маловероятным их сколько-нибудь значимое участие в энергетике геодинамо даже и при некотором повышении суммарного теплового потока из ядра в древности.

По-видимому, сам не осознавая того, первым механизм древнейшей композиционной конвекции предложил Юри [29] в 1952 году. Он предположил, что ядро растет за счет мантии – железо из мантии медленно и непрерывно «просачивается» в ядро, а тепло, которое высвобождается в результате этого процесса, вызывает конвекцию. Сделаем поправку – тяжелое железо, просочившись в чуть менее плотное жидкое ядро, очевидно, не остановится, а будет дальше опускаться, что может вызвать достаточно эффективную композиционную конвекцию. В прошлом мантия содержала

больше свободного железа, и в то время осаждение из мантии, вероятно, играло большую роль, чем теперь. Палеомагнитным свидетельством геодинамо движимого подобной конвекцией может быть несколько большая величина древнейшего (~4 млрд. лет назад) поля с последующим его убыванием до относительного минимума около миллиард-полмиллиарда лет назад. Затем поле нарастает благодаря усиливающейся со временем конвекции Брагинского [17, 23].

Сходный палеомагнитный сигнал и энергетический геодинамо сценарий, но с еще большими величинами магнитных полей мог осуществляться при наиболее вероятной и пока наилучшим образом обоснованной композиционной конвекции, предложенной в [30]. В этой работе показывается, что древнейшую конвекцию в остывающем ядре, вероятно, поддерживали всплывающие магниевые оксиды и/или силикаты, которые проникли в ядро в результате столкновения Земли с объектом подобным Марсу. Такое сформировавшее Луну соударение (возможно и неоднократное) могло разогреть Землю до  $10^4$  К и даже привести к ее полному расплавлению [31–33]. При этом уничтожалась вероятная сразу после аккреции стабильная стратификация ядра [34], а магниевые оксиды/силикаты при таких высоких температурах обильно [35] растворялись в сантиметровых металлических каплях ставшей почти однородно перемешанной Земли [36]. В результате последовавшего за этим остывания и вторичной дифференциации температура уменьшилась и с ней катастрофически уменьшалась растворимость магниевых легких компонент [37], которые к современной эпохе практически все всплыли к мантии. Возникающая при этом композиционная конвекция, вероятно, была на начальной стадии (4–2 млрд. лет назад) в несколько раз мощнее современной конвекции Брагинского, см. некоторые детали на рис. 2.



**Рис. 2.** Копия рисунка 3 из [30]. В зависимости от времени в прошлое изображены: (а) температура границы ядро-мантия, (б) нормализованный современный радиус внутреннего ядра и (с) тепловой поток из ядра. Производству энтропии в 500 МВт/К для омических потерь геодинамо соответствует суммарная мощность конвекции  $FM$  примерно 3 ТВт, а 250 МВт/К – 1.5 ТВт. Наиболее вероятной скорости осаждения магниевых веществ соответствует 0.005 wt% K<sup>-1</sup>. Очевидны нереалистические значения древнейших температур и тепловых потоков (сплошная зеленая/коричневая), которые необходимы для поддержания геодинамо только за счет температурных эффектов.

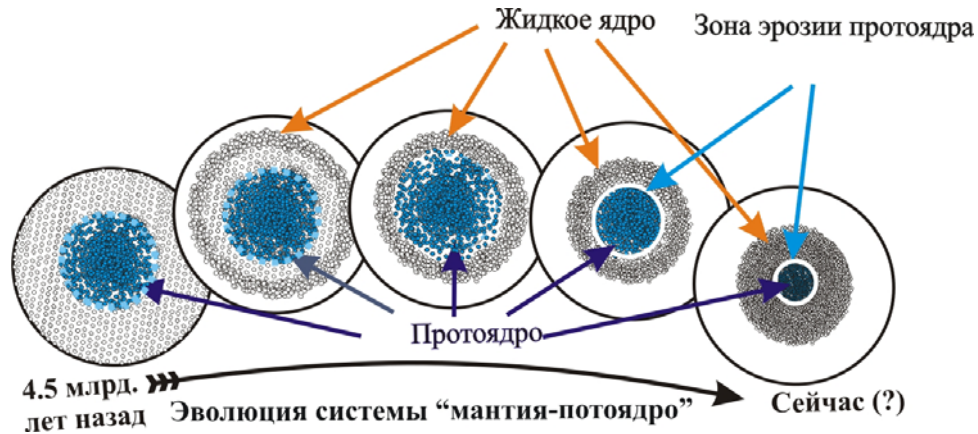
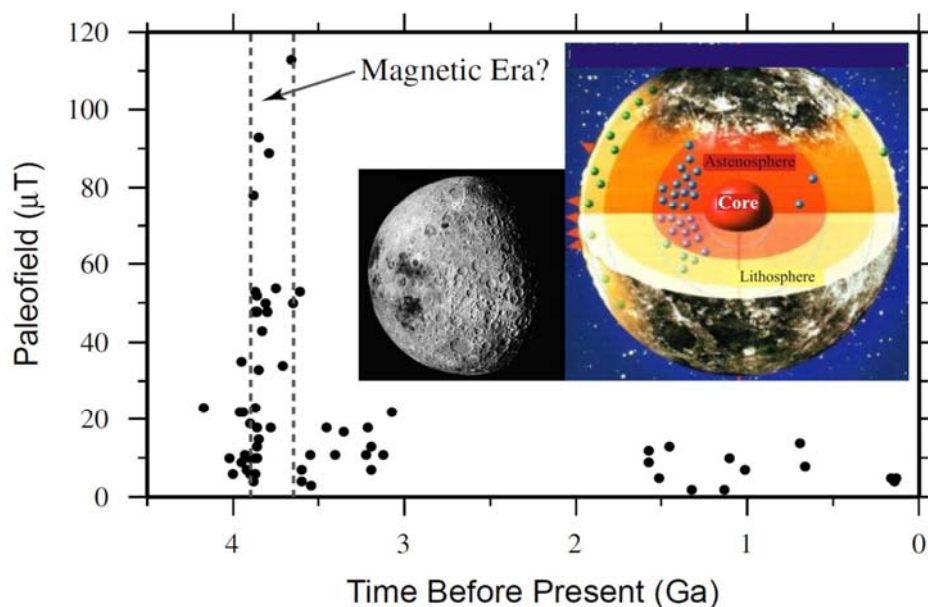


Рис. 3. Схематическая эволюция системы мантия – протоядро.

Другой, не требующий, довольно маловероятного, соударения механизм древнейшей композиционной конвекции был предложен в [19, 38]. Авторы предполагали, что в результате сильно неоднородной (намного сильнее, чем в [39]) аккреции образовалось дифференцированное твердое протоядро (темно-синее на рис. 3). Затем, как и в других моделях [31, 34–35, 39–40], при финальной бомбардировке планетезиμαлями образовался глубокий магматический океан (серое). Металлическая геосфера (темно-серое) медленно эродировала через протоядро вниз, а выплавляющие при этом из протоядра легкие примеси (белое), поднимаясь, порождали очень мощную композиционную конвекцию в жидком ядре. Слабыми местами такой концепции протоядра являются требование слишком сильно неоднородной аккреции, изначальная сильная дифференциация протоядра без жидкой компоненты и чрезмерно высокая мощность результирующей конвекции. Чтобы избавиться от этих недостатков, модернизируем концепцию, считая в свете современных воззрений [40], что частично жидкое протоядро могло образоваться при аккреции, сопровождавшейся частичной его дифференциацией. При этом в протоядре «задержится» не так много легкой примеси, но результирующая мощность конвекции может быть сопоставима с мощностями представленных выше конвективных механизмов. Подобной [26] палеомагнитной «подписью» конвекции с протоядром могло бы быть сравнительно слабое наидревнейшее геомагнитное поле. Затем оно росло и достигло максимума около 2-х миллиардов лет назад. Далее поле спадало до минимума, который, как и для двух других рассмотренных выше механизмов, пришелся на эпоху начала конвекции Брагинского.

Аналогично последнему сценарию могло генерироваться поле Луны, максимальную величину которого [41–43] оценивают в несколько раз больше геомагнитного (детали см. рис. 4 и его подпись). Это возможно лишь при таком особом «протоядерном» или смешанном с «ударным» типе конвекции и/или с сильным приливным воздействием древней Земли.



**Рис. 4.** Рисунок взят из [41]. Краткой (из-за малых размеров Луны) магнитной эре (Magnetic Era ~ 4 Ga) с ростом величины поля до значений в несколько раз больше геомагнитных могло предшествовать формирование протоядра и/или столкновение, породившее Луну. Затем поле уменьшилось до минимума и с ~ 3.6 до 3 млрд. лет назад гидромагнитное динамо поддерживал аналог конвекции Брагинского [23, 42].

Эта работа была частично поддержана грантом РФФИ № 16-05-00507 а.

#### Литература

1. Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* V. A358. P. 957–990. 2000.
2. Korte, M., Constable, C.G. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6 Q02H16. 2005.
3. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. – 312 с.
4. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 91 (1–3). P. 63–75. 1995.
5. Christensen U.R. Dynamo Scaling Laws and Applications to the Planets // *Space Sci Rev.* V. 152, P. 565–590. 2010.
6. Christensen U., Aubert J., Hulot G. Conditions for Earth-like geodynamo models // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 296. P. 487–496. 2010.
7. Sheyko A. Numerical investigations of rotating mhd in a spherical shell. Ph.D. thesis. ETH-Zurich. 2014. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010198511>
8. Davies C.J., Constable C.G. Insights from geodynamo simulations into long-term geomagnetic field behavior // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 404. P. 238–239. 2014.
9. Matsui H., et al. (37 authors), Performance benchmarks for a next generation numerical dynamo model // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 17 (5). P. 1586–1607. 2016.
10. Starchenko S.V. Analytic base of geodynamo-like scaling laws in the planets, geomagnetic periodicities and inversions // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 54. No 6. P. 694–701. 2014.

11. *Moffatt H.K.* Magnetic field generation in electrically conducting fluids, Cambridge University Press, 1978.
12. *Davidson P.A.* An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge University Press, 2001.
13. *Olson P., Amit H.* Changes in earth's dipole // *Naturwissenschaften*. V. 93. P. 519–542, 2006.
14. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
15. *Gomia H., Ohtaa K., Hirosea K. et al.* The high conductivity of iron and thermal evolution of the Earth's core // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 224. P. 88–103. 2013.
16. *Pozzo M., Davies C., Gubbins D., Alfe D.* Thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions // *Nature*. V. 485. P. 355–358. 2012.
17. *Braginsky S.I., Roberts P.H.* Equations governing convection in the Earth's core and the geodynamo // *Geoph. Astroph. Fluid Dyn.* V. 79. P. 1–97. 1995.
18. *Starchenko S.V., Jones C.A.* Typical velocities and magnetic field strengths in planetary interiors // *Icarus*. V. 157. P. 426–435. 2002.
19. *Starchenko S.V., Pushkarev Y.D.* Magnetohydrodynamic scaling of geodynamo and a planetary protocore concept // *Magnetohydrodynamics*. V. 49. No. 1. P. 35–42. 2013.
20. *Старченко С.В.* Наблюдательная оценка магнитного поля и параметров геодинамо под поверхностью ядра Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 5. С. 712–718.
21. *Korte M., Constable C.* Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3 ka // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 188. P. 247–259. 2011.
22. *Ziegler L., Constable C., Johnson C., Tauxe L.* PADM2M: a penalized maximum likelihood model of the 0-2 Ma palaeomagnetic axial dipole moment // *Geophys. J. Int.* V. 184. P. 1069–1089. 2011.
23. *Брагинский С.И.* О строении слоя F и причинах конвекции в ядре Земли // *ДАН СССР*. Т. 149. № 6. С. 1311–1314. 1963.
25. *Старченко С.В., Степанов А.А.* Источники и потоки тепла в мантии Земли // *ДАН*. Т. 384. № 3. С. 391–394. 2002.
26. *Macouin M., Valet J.-P., Besse J.* Long-term evolution of the geomagnetic dipole moment // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 147. P. 239–246. 2004.
27. *Tarduno, J.A., Cottrell R.D., Watkeys M.K. et al.* Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago // *Science*. V. 327. P. 1238–1240. 2010.
28. *Tarduno J.A., Cottrell R.D., Davis W.J., Nimmo F., Bono R.K.* A Hadean to Paleoproterozoic geodynamo recorded by single zircon crystals // *Science*. V. 349. No. 6247. P. 521–524. 2015.
29. *Urey H.C.* The Planets: Their Origin and Development, Yale University Press, 1952.
30. *O'Rourke J.G., Stevenson D.J.* Powering Earth's dynamo with magnesium precipitation from the core // *Nature*. V. 529. P. 387–389. 2016.
31. *Canup R.M.* Accretion of the Earth // *Phil. Trans. R. Soc.* V. A 366. P. 4061–4075. 2008.
32. *Canup R.M.* Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // *Science*. V. 338. P. 1052–1055. 2012.
33. *Cuk M., Stewart S.T.* Making the Moon from a fast-spinning Earth: a giant impact followed by resonant despinning // *Science*. V. 338. P. 1047–1052. 2012.
34. *Helffrich G.* Outer core compositional layering and constraints on core liquid transport properties // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 391. P. 256–262. 2014.
35. *Wahl S.M., Militzer B.* High-temperature miscibility of iron and rock in terrestrial planet formation // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 410. P. 25–33. 2015.

36. *Dahl T., Stevenson D.J.* Turbulent mixing of metal and silicate during planet accretion and interpretation of the Hf-W chronometer // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 295. P. 177–186. 2010.
37. *Poirier J.* Light elements in the Earth's outer core: a critical review // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 85. P. 319–337. 1994.
38. *Pushkarev Y., Starchenko S.* Solid core as relic of protocore // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* V. 74, Issue 11, Supl. 1. P. A835. 2010.
39. *Rubie, D.C. et al.* Heterogeneous accretion, composition and core-mantle differentiation of the Earth // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 301. P. 31–42. 2011.
40. *Rubie D.C., Jacobson S.A.* Mechanisms and Geochemical Models of Core Formation. In: *H. Terasaki and R.A. Fischer* (eds) *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core.* 2016. DOI: 10.1002/9781118992487.ch14
41. *Fuller M., Cisowski S.M.* Lunar paleomagnetism. In: *Geomagnetism. Jacobs J.A.* (ed.) Academic Press. P. 307–455. 1987.
42. *Suaveta C., Weissa B.P., Cassatab W.S.* Persistence and origin of the lunar core dynamo // *PNAS.* V. 110. No. 21. P. 8453–8458. 2013.
43. *Perera V.* Lunar geophysics: The Moon's fundamental shape and paleomagnetism studies. In: *UC Santa Cruz Electronic Theses and Dissertations.* 2014. <http://escholarship.org/uc/item/1ng5z1jx>

## *Chapter 9*

### **OBSERVATIONAL, MODEL AND PALEOMAGNETIC FOUNDATIONS OF THE EARTH'S AND LUNAR HYDROMAGNETISM**

© **S.V. Starchenko**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
Moscow, Troitsk, Russia*

Hydrodynamic dynamo is possible only if a sufficiently powerful convection, which in the Earth's and Lunar core is probably non-thermal. Scaling laws were derived for binding convective power with typical values for the velocity, magnetic field and their sizes, which are linked to the observed and older magnetic variations.

Supportive geodynamo compositional convection of Braginsky [1963] in the crystallization of the heavy fraction from a liquid to a solid core began less than a billion years ago. More ancient field supports another type of convection. Known mechanisms for the implementation of such convection have different scenarios of magnetic evolution, which may help the identification of the actual mechanism by paleomagnetic reconstructions. Similarly, the ancient field could be generated in the Moon, whose value is estimated at several times the geomagnetic, which is possible with a special type of convection and/or with strong tidal action of the Earth.

## ***Раздел 3***

# Ранняя Солнечная система и предбиологический синтез органического вещества

*редактор В.М. Чепурова*



## **Глава 10**

### **МОДЕЛИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ; РАННЯЯ ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ И ВЕНЕРЫ (РОЛЬ ПРИЛИВНОГО ТРЕНИЯ В ОБРАЗОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПЛАНЕТ)**

© Г.В. Печерникова<sup>1,2</sup>, Е.Л. Рускол<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

Представлен аналитический обзор двух современных моделей происхождения системы Земля–Луна в процессе твердотельной аккреции: так называемая модель ко-аккреции и в результате гигантского столкновения Земли с телом планетарного размера (т.е. модель мегаимпакта). Модель ко-аккреции можно рассматривать как универсальный механизм образования спутников планет, который сопровождает рост планет. Мы рассматриваем условия этого процесса, которые могут обеспечить достаточную массу и угловой момент протолунного диска, такие как макроудары (столкновения с телами астероидных размеров) в мантию растущей Земли, роль зародыша Луны, растущего на геоцентрической лунной орбите и его приливное взаимодействие с Землей. Наиболее сложным остается объяснение химического состава Луны. Рассматриваются различные сценарии мегаимпакта, в которых мантия Земли разрушается, а протоспутниковый диск заполняется главным образом её фрагментами.

Оценен вклад приливной эволюции лунной орбиты в термику Земли – он на порядок ниже трёх основных источников нагрева недр Земли: энергии аккумуляции, энергии дифференциации и нагрева радионуклидами. Приливный нагрев недр Венеры может достигнуть 1000К с учетом торможения её начального осевого вращения в дополнение к трем источникам, упомянутым выше в отношении Земли.

### **Введение**

Теории происхождения Луны можно подразделить на несколько направлений. Здесь мы рассмотрим модели твердотельной аккумуляции:

*I* – модели ко-аккреции – описывают формирование долунного околоземного роя, как процесс, сопутствующий росту Земли;

*II* – модели гигантского удара (мегаимпакта) – столкновения протоземли на поздней стадии её роста с другим крупным телом;

*III* – обобщенная модель ко-аккреции, учитывающая вклад ударов крупных тел – макроимпакты.

Образование Луны – старая и очень важная проблема планетологии и геофизики, которая до сих пор не имеет окончательного решения.

Любая теория происхождения Луны должна удовлетворять основным характеристикам системы Земля–Луна. Это определенная масса Луны (0.012 от массы Земли), угловой момент системы, низкая плотность Луны по сравнению с Землей, недостаток железа в Луне, схожесть и различие Земли и Луны по ряду геохимических показателей.

### **Модель ко-аккреции**

Модель ко-аккреции системы Земля–Луна описывает эволюцию до-спутникового околопланетного роя, растущего за счет аккреции вещества из зоны питания планеты в процессе ее роста. Впервые разработку такой теории предложила Е.Л. Рускол [1, 2] на основе идеи академика О.Ю. Шмидта об образовании спутников как процессе, сопровождающем рост планет. Позднее американские планетологи в модели ко-аккреции показали, что рост зародыша Луны и его приливное отодвигание от Земли приводит к увеличению массы и момента Луны [3].

Масса вещества и ее распределение в рое могут меняться в результате следующих основных процессов: 1) притока вещества из зоны питания планеты, 2) выметания частиц простреливающими рой крупными телами зоны, 3) выпадения вещества роя на планету, 4) дрейфа вещества к планете из-за уменьшения размеров орбит частиц с увеличением массы планеты («инвариант Джинса»), 5) дрейфа к планете из-за того, что момент количества движения захватываемого вещества меньше момента на околопланетной круговой орбите на расстоянии захвата. Кроме того, на отдельных стадиях формирования роя важно учитывать еще ряд эффектов.

Расширение теории аккумуляции массы и углового момента на случай планеты с роем [4] делает возможным построение теории эволюции околопланетного диска. В приближении плоского роя поверхностная плотность вещества в диске связана с радиальной скоростью в нем и источниками вещества уравнением непрерывности. Это уравнение описывает процессы, доминирующие в перераспределении вещества в рое, т.е. радиальную диффузию и радиальный дрейф из-за дефицита углового момента захваченного вещества и роста самой планеты, в результате чего вещество из внутренней области роя выпадает на планету. Рой оказывается сильно уплощенным вблизи планеты и почти сферичен на его периферии. Основными источниками вещества в рое в модели ко-аккреции [2] рассматривались гравитационный захват в сферу Хилла растущей планеты при неупругих столкновениях частиц, не связанных с планетой («свободно-свободные» столкновения), и захват частиц зоны питания планеты при их столкновениях с частицами роя («свободно-связанные» столкновения).

Наиболее полно модель ко-аккреции исследована в работе [5], где формирование роя и его динамическая эволюция рассмотрены в деталях. На более поздних стадиях рой пополняется раздробленным веществом при высокоскоростных столкновениях тел зоны питания с телами роя. Оценены скорости тел в рое, растущие вследствие ударов внешних тел. Рассмотрены процессы аккумуляции и дробления тел роя и распределение их по массам. Характерные временные масштабы кинетических процессов в роях на порядки величин короче, чем время жизни роев, определяемое временем аккумуляции планет. Однако из этой модели следует дефицит массы и момента, хотя ко-аккреционные модели хорошо описывают спутниковые

системы планет-гигантов. Как выяснилось позднее, в этой модели существенно занижена вероятность захвата в рой частиц зоны питания планеты.

### **Модель мегаимпакта**

Второе направление, возникшее как альтернатива первому (коаккреции) для объяснения уникально большого отношения масс Луны и Земли (1/81) и большого углового момента системы Земля–Луна – это модели гигантского удара (мегаимпакта) – катастрофического столкновения прото-Земли с крупным космическим телом размером с Марс на поздней стадии её роста, впервые предложенные в [6, 7]. В моделях мегаимпакта при почти касательном ударе тела-ударника образуется массивный протолунный диск с большим угловым моментом, из которого впоследствии формируется Луна. В этих моделях подбираются соотношение масс тела-ударника и растущей Земли, скорость удара и ударный параметр так, чтобы в итоге получилась система Земля–Луна с заданными массами и угловым моментом. С соответствующим подбором входных параметров можно объяснить почти всё. Остаются вопрос о вероятности такого «специально подобранного» удара и большие трудности геохимического характера.

На конференции 1984 г. на Гавайях была представлена целая серия работ по моделям мегаимпакта, и гипотеза происхождения Луны в результате гигантского удара приобретает все большую популярность.

В 2014 г. опубликованы результаты обсуждения проблемы происхождения Луны [8] со вступительной статьей [9], где отмечено, что в науке о Луне в настоящее время есть два ключевых источника информации для выяснения происхождения Луны: первый – это новое моделирование динамических процессов, второй – это измерение изотопного состава отдельных элементов в лунных и земных образцах с беспрецедентной точностью.

В обсуждении современного состояния теории происхождения системы Земля–Луна приняли участие более тридцати авторов 18-ти работ. Около трети работ содержат все более сложные сценарии мегаимпакта вплоть до «неканонических» в попытках объяснить современные характеристики системы Земля–Луна. Большая часть работ посвящена проблеме различий химического состава вещества Луны и Земли при почти полном совпадении изотопных систем. Как пишет Джей Мелош, «последние сравнения изотопного состава Земли и Луны показывают, что, в отличие от почти всех других тел, известных в Солнечной системе, изотопные отношения нашего спутника являются почти идентичными земным почти для каждой изотопной системы... И эту ситуацию трудно объяснить на основе современных импактных моделей происхождения Луны». В нескольких работах обсуждается проблема подобия обилий тугоплавких и дефицита летучих на Луне по сравнению с Землей, которая также приводит к сильным ограничениям на процессы формирования Луны.

К каноническим моделям можно отнести работу [10], где приведены около 100 результатов моделирования потенциальных формирующих Луну ударов в сценарии «позднего импакта». Успешными признаны 47 из них с входными параметрами: масса ударника  $M_i$  от 1 до 1.3 массы Марса, суммарная масса ударника и растущей Земли  $M_T \geq 0.95M_\oplus$  ( $M_\oplus$  – современная масса Земли), скорости удара  $1.0 \leq (v_{\text{imp}}/v_{\text{esc}}) \leq 1.1$  и ударный параметр в диапазоне  $0.67 \leq b \leq 0.76$  (соответствующий диапазону угол удара составляет от 42 до 50 градусов), результирующий угловой момент в диапазоне  $1.07 \leq L/L_{\text{EM}} \leq 1.37$ , где  $L_{\text{EM}}$  – современный угловой момент системы Земля–Луна.

В ряде работ за последние два десятилетия было показано, что Луна и Земля идентичны по изотопным системам кислорода, вольфрама, хрома и титана. Для объяснения этой ситуации в рамках гипотезы мегаимпакта в 2012 году предложена новая модель – не каноническая [11]. В качестве мишени принята быстро вращающаяся (из-за многочисленных гигантских ударов) Земля с массой от 0.99 до 1.05  $M_\oplus$ , периодом вращения от 2.3 до 2.7 ч. и угловым моментом от 2.1 до 3.1  $L_{\text{EM}}$ . В результате последнего гигантского удара (масса ударника от 0.026 до 0.1  $M_\oplus$ , скорость  $V_i$  от 10 до 30 км/с) образуется диск достаточно массивный для образования Луны в основном из вещества Земли. Впоследствии избыток углового момента был потерян в ходе приливной эволюции Луны. Эта модель получила дальнейшее развитие в [12], а также еще в шести работах тех же авторов, опубликованных в Proc. 47th Lunar Planet. Sci. Conf (2016). Авторы «неканонической» модели формирования системы Земля–Луна [11, 12] в последней своей работе [13] сначала создают большой угол наклона ( $70^\circ$ ) оси быстро вращающейся (с периодом 2.5 часа!) Земли к плоскости эклиптики и большое наклонение лунной орбиты при соответственно большом угловом моменте системы, а потом с ними борются.

Модель мегаимпакта с высокой энергией и большим угловым моментом [12] была поддержана в работе [14], где сообщается, что лунные породы обогащены тяжелыми изотопами калия по сравнению с Землей и хондритами. Авторы предположили, что обогащение тяжелым изотопом калия  $^{41}\text{K}$  лунных пород по сравнению с Землей и хондритами может быть объяснено как результат неполной конденсации земных силикатных паров при внешнем давлении выше 10 бар в соответствии с моделью [12].

Ранее авторы работы [15] провели сравнительный анализ возможностей формирования системы Земля–Луна с наблюдаемыми физическими и химическими характеристиками в результате гигантского удара в моделях как канонических, так и неканонических дисков, и пришли к заключению, что «происхождение земной Луны остается нерешенной проблемой».

### Статистическая обобщенная модель ко-аккреции

Третье направление представляет обобщенная модель ко-аккреции, учитывающая вклад ударов крупных тел – макроимпакты [16–18].

Как было сказано выше, теория происхождения Луны должна объяснить массу Луны ( $1/81M_{\oplus}$ ), угловой момент системы и геохимические соотношения.

Решение задачи об осевом вращении планет, приобретенном в ходе их роста, рассматривается в рамках стандартного сценария происхождения Солнечной системы. Согласно Сафронову [19] осевой момент вращения планеты  $\mathbf{K}$ , направленный под углом  $\varepsilon$  к оси  $z$ , перпендикулярной к плоскости орбиты, можно рассматривать как сумму регулярной составляющей  $\mathbf{K}_1$ , направленной по оси  $z$ , и случайной составляющей  $\mathbf{K}_2$ , направленной под углом  $\gamma$  к оси  $z$ .

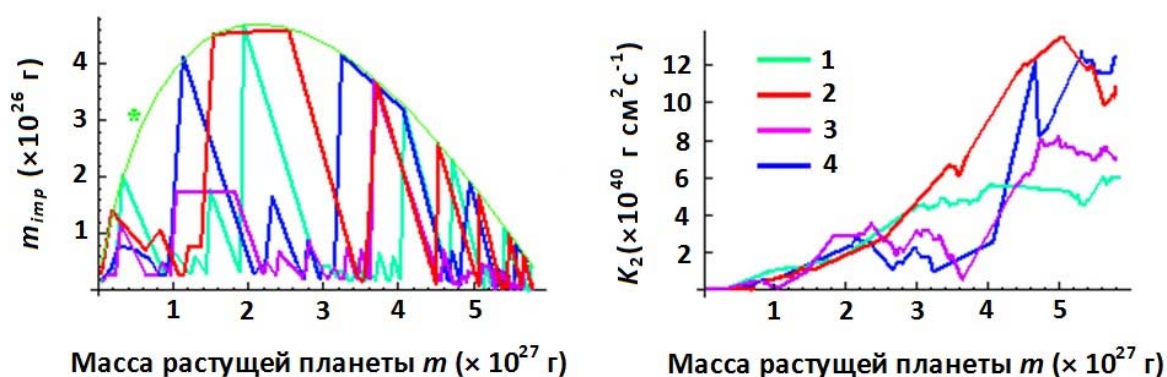
Регулярная составляющая момента  $\mathbf{K}_1$  приносится, в основном, телами с почти касательных компланарных орбит. В [17, 20] с учетом крупных тел была найдена зависимость регулярной составляющей момента осевого вращения от относительной массы растущей планеты  $\mathbf{K}_1(m(t)/m_p)$ , где  $m_p$  – современная масса планеты.

Случайная составляющая момента связана с дискретностью процесса роста планеты. При выпадении на планету тело массы  $m'$  приносит планете регулярную составляющую  $\mathbf{K}_1$ , направленную по оси  $z$ , и случайную составляющую  $\mathbf{K}_2$ , направление и величина которой по определению случайные величины. Рассматривая выпадение тел  $m'$  на планету как случайный процесс, мы нашли дисперсию случайной величины  $\mathbf{K}_2$ , величину стандартного отклонения  $K_{\sigma} = \pm\sqrt{K_2^2}$ , характеризующего точность определения момента осевого вращения планеты  $K$  и соответствующее среднее значение  $\tilde{K} = \mathbf{K}_1(m(t)/m_p) + \mathbf{K}_{\sigma}(m(t)/m_p)$  [17]. Для Земли к концу аккумуляции при  $m(t) = m_p$  получены величины (в г см<sup>2</sup>/с)  $\mathbf{K}_1(m_p) = 6.5 \cdot 10^{40}$ ,  $\mathbf{K}_{\sigma}(m_p) = 2.9 \cdot 10^{41}$ ,  $\tilde{K} = \mathbf{K}_1(m_p) + \mathbf{K}_{\sigma}(m_p) = 3.55 \cdot 10^{41}$ . Следует отметить, что приобретение осевого вращения растущей планетой (без роя) оценивалось в предположении полного объединения сталкивающихся тел, а современный момент системы Земля–Луна  $L_{EM} = 3.45 \cdot 10^{41}$  г см<sup>2</sup>/с без каких-либо дополнительных предположений попадает в полученный нами интервал  $\tilde{K}$ .

Результаты моделирования макроимпактов показали, что малая доля вещества сталкивающихся тел выбрасывается на баллистические и гелиоцентрические орбиты [21], унося с собой и часть момента, приносимого планете макроударами. При реаккумуляции планетой и допланетным роем это вещество возвращает момент системе.

Удары крупнейших тел и приращение момента растущей планеты рассматривались в дискретной стохастической модели роста Земли [22]. В этой работе на каждом шаге по времени случайным образом выбиралось 6 величин: масса тела-ударника из десяти крупнейших после растущей пла-

неты тел (в соответствии с их распределением по массам), точка удара на поверхности планеты и направление скорости удара. Одновременно вычислялись все необходимые согласно теории роста планеты непрерывные функции массы растущей планеты. Расчеты показали, что в процессе роста Земля испытала не единственный гигантский удар (мегаимпакт), а несколько столкновений с телами с массами  $m' > 10^{26}$  г. На рисунке приведено 4 расчета роста массы планеты с выделенными ударами крупнейших (от 5 до 7 с  $m_i > 10^{26}$  г) тел (слева) и соответствующего увеличения модуля случайного момента  $K_2$  осевого вращения в результате ударов этих тел (справа). Изменение величины верхнего предела распределения масс допланетных тел  $M_1(m)$  показано кривой “\*”. Можно видеть, что с учетом регулярной составляющей момента  $K_1$  суммарный момент близок к наблюдаемому моменту системы.



Приведенные выше “макро”-оценки накопления момента осевого вращения Земли не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования окодоземного роя с соответствующим орбитальным моментом.

В работе [23] рассмотрена проблема однородности состава вещества, из которого формируются планетезимали, объединяющиеся в планету. Расширено понятие зоны питания растущей планеты – учтены ненулевой эксцентриситет орбиты планеты и влияние крупных тел на скорость роста планеты. Рассмотрены различные механизмы перемешивания вещества в зоне питания планеты и их роль в формировании системы Земля–Луна.

Зона питания растущей Земли довольно узкая – всего около половины астрономической единицы, в ней нет резких температурных границ, что предполагает относительно однородный состав твердого вещества. Кроме того, быстрый рост ширины зоны питания приводит к хорошему перемешиванию планетезималей внутри зоны. Планета набирает массу в основном за счет крупных тел, в которых вещество тоже хорошо перемешано и при наборе массы на эллиптических орбитах в разных частях зоны питания планеты, и при ударном перемешивании при столкновениях с меньшими телами [18]. При разрушении допланетных тел в результате высокоско-

ростных столкновений [17] происходит разброс осколков, а затем их реаккумуляция другими телами □ дополнительное перемешивание.

Как показано в работе [24], сильное фракционирование литофильного Hf от сидерофильного W во время формирования ядра делает Hf-W систему идеальным хронометром для дифференциации. Однако для больших планет земной группы рассчитанные Hf-W возраста особенно чувствительны к макроимпактам. Вольфрам-модельные возраста для образования ядра Земли сильно размазаны. В то же время расчетные возраста формирования ядра Марса лежат в диапазоне от 0 до 20 млн лет после формирования САI. Можно предположить, что Марс, масса которого составляет около 0.1 от массы Земли, не дорос до разрушительных макроимпактов. Это, в свою очередь, допускает такую же раннюю дифференциацию и формирование ядер и мантий у растущей Земли и крупнейших планетезималей с соответственно близкими составами. Следовательно, вещество выбросов при макроимпактах из растущей Земли и тела-ударника подобно.

В работе [25] рассмотрен третий источник пополнения долунного роя веществом в дополнение к захвату тел при свободно-свободных и свободно-связанных столкновениях в сфере Хилла растущей планеты – получена оценка потока вещества, выброшенного при столкновениях планеты с допланетными телами на баллистические и гелиоцентрические орбиты в процессе её роста. Ранее энергетические оценки показали [26], что масса вещества  $m_e$ , выброшенного из сферы влияния планеты при ударе, может составлять до  $\sim 10^{-1}$  от массы тела-ударника. Численное моделирование макроимпактов [21] подтвердило эти оценки. В работе [27] по результатам численного моделирования была получена аналитическая оценка – всего за время роста Земли, начиная с половины ее массы, из сферы влияния планеты выбрасывается около 4% современной массы Земли, что более чем в три раза превышает массу Луны. Подпитка околоземного роя веществом, выброшенным при ударах планетезималей, может существенно увеличить массу формирующегося долунного роя.

Наша ко-аккреционная статистическая модель формирования Луны (*модель III*) определяется двумя составляющими: 1 – образование околоземного роя в результате гравитационного захвата тел и частиц из зоны питания планеты в соответствии с ко-аккреционной *моделью I*, 2 – подпитка околоземного роя веществом, выброшенным при макроударах, при столкновениях частиц роя с частицами выбросов. Большая эффективность такого захвата показана в работе [28].

### **Ранняя история Земли и Венеры**

#### **(роль приливного трения в образовании структуры планет)**

Изучение истории лунной орбиты под действием приливов Луны и Солнца накладывает ограничения на начальное расстояние Луны от Земли [29]. Наиболее вероятной зоной для аккумуляции Луны из околосолнечно-

го роя частиц и тел является пояс на расстояниях от 10 до  $30R_{\oplus}$ ,  $R_{\oplus}$  – радиус современной Земли (сейчас Луна обращается на расстоянии  $60.3R_{\oplus}$ ). При более близком начальном расстоянии плоскость её орбиты должна была бы совпадать с экваториальной плоскостью Земли, а при более далёком, чем  $30R_{\oplus}$  – с эклипстикой, чего не наблюдается. Приливная энергия при отодвигании Луны вероятнее всего тратится на нагревание слоев верхней мантии, где деформации значительны, а вязкость понижена. За всё время отодвигания в Земле выделилось  $1-3 \times 10^{38}$  эрг, что на порядок ниже других источников энергии (дифференциация, радиоактивный распад). Первичное вращение Земли могло быть с периодом около  $10^h$  [30].

В модели ко-аккреции максимальный импакт, дающий наклон экватора Земли к эклиптике  $23.5^\circ$ , мог быть вызван телом с массой 7–10% от массы Земли. В модели мегаимпакта тело, разрушившее Землю, составляло не менее 20% её массы, и образование Луны в зоне  $10-30R_{\oplus}$  плохо вписывается в модель [11].

Тепловой режим Венеры оценивался в предположении, что её состав близок к земному, ядро составляет около 30% массы, а первичное вращение происходило с периодом  $8^h$ . Тогда радиоактивный разогрев и энергия дифференциации (примерно поровну) составляли  $2.5 \times 10^{38}$  эрг, а торможение вращения солнечными приливами дало на порядок меньший вклад энергии [31]. Приливная энергия выделялась в основном в недрах Венеры. Соответствующий нагрев в градусах на единицу массы составлял около  $750^\circ$ . Эволюция спутниковых орбит у медленно вращающихся планет приводит к выпадению их спутников на планеты [32]. Оба фактора – торможение начального более быстрого вращения Венеры и выпадение на нее спутников – могли дать ей суммарный нагрев в  $1000^\circ$  на единицу массы.

Известно, что тектоника плит очень эффективна при охлаждении глубинных недр планеты, потому что холодные плиты проникают глубоко в мантию. Можно предположить, что ядро Земли охлаждено до температуры ниже ликвидуса основного сплава [33]. Тепловые модели эволюции показывают, что существование современного магнитного поля Земли связано с ростом внутреннего ядра (модель композиционного динамо) [34].

Венера – планета такого же размера, но высокая температура поверхности плюс дополнительный нагрев верхних слоев мантии за счет приливно-торможения ее вращения привели к уменьшению градиента температуры. Ей не хватило такого эффективного механизма охлаждения, как тектоника плит, и, по-видимому, охлаждения за счет конвекции под толстой стационарной корой. Следовательно, тепловой поток от ядра стал подкритическим с течением времени, и ядро могло быть недостаточно охлаждено для достижения температуры ликвидуса.

И в заключение, имеет ли планета земной группы конвекцию в ядре и может ли это быть термическое или композиционное динамо, зависит от

скорости охлаждения ядра, температуры ядра и температуры плавления ядра.

### Литература

1. *Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. I. Образование околоземного роя тел // *Астрон. Журн.* 1960. Т. 37, вып. 3. С. 690–702.
2. *Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 185 с.
3. *Harris A.W., Kaula W.M.* A coaccretional model of satellite formation // *Colloq. IAU 28 "Planetary Satellites"*, Aug. 1974, Ithaca.
4. *Печерникова Г.В., Маева С.В., Витязев А.В.* К динамике околопланетных роев // *Письма в "Астрон. журн."* 1984. Т. 10. № 9. С. 703–709.
5. *Safronov V.S., Pechernikova G.V., Ruskol E.L., Vityazev A.V.*, Protosatellite swarms // *Satellites* / Eds. J.A. Burns, M.S. Matthews. Tucson: Univ. of Arizona Press. 1986. P. 89–116.
6. *Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* **24**, 1975. 504–515.
7. *Cameron A.G.W., Ward W.R.* The origin of the Moon. // *Lunar and Planetary Science Conference VII.* 1976. P. 120–122.
8. Discussion Meeting Issue ‘Origin of the Moon: challenges and prospects’ organised and edited by David J. Stevenson and Alex N. Halliday // [rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2024/](http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2024/) September 13, 2014;
9. *Stevenson D.J. and Halliday A.N.* The origin of the Moon // *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2014. **372**, 20140289, published 11 August 2014.
10. *Canup R.M.* Simulations of a late lunar-forming impact // *Icarus*. 2004. V. 168. P. 433–456.
11. *Ćuk M., Stewart S.T.* Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning // *Science*. 2012. **338**, p. 1047.
12. *Lock S.J. et al.* A new model for lunar origin: equilibration with earth beyond the hot spin Stability limit // *47th Lunar and Planetary Science Conference (2016)* 2881.
13. *Ćuk M., Hamilton D.P., Lock S.J., Stewart S.T.* Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth // *Nature*, 2016. DOI: 10.1038/nature19846.
14. *Wang K., Jacobsen S.B.* Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon // *Nature*, 2016. 19341
15. *Salmon J., Canup R.M.* Accretion of the Moon from non-canonical discs // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2014. **372**: 20130256.
16. *Печерникова Г.В.* К формированию и эволюции околопланетных роев // *Планетная космогония и науки о Земле / Под ред. В.А. Магницкого.* М.: Наука, 1989. С. 106–139.
17. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
18. *Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // *Физика Земли.* 1996. № 6. С. 3–16.
19. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
20. *Печерникова Г.В.* Приобретение момента импульса в статистической коаккреционной модели формирования системы Земля–Луна // *Сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 4.* М.: ГЕОС, 2013. С. 61–66.
21. *Svetsov V.V., Pechernikova G.V., Vityazev A.V.* Possibility of Moon formation from debris escaped after impacts on the Earth / *Formation and Evolution of Moons.* 46th ISLAB Symposium, 25–28 June 2012, Noordwijk, The Netherlands. [<http://sci.esa.int/eslab46>]

22. *Pechernikova, G.V. Davidenko, I.W., Vityazev, A.V.* Estimation of axial moment of the growing Earth // III Internat. Conf. on Large Meteorite Impacts. Nordlingen, 2003. Sess. 1. #4015.
23. *Печерникова Г.В.* О зоне питания растущей планеты и проблеме образования Луны // Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 6. М.: ГЕОС, 2014. С. 154–162.
24. *Kleine T et al.* Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets // *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73. 2009. P. 5150–5188.
25. *Печерникова Г.В.* Масса вещества, выброшенного при макроударах с растущей планеты, и проблема образования Луны // Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 7. М.: ГЕОС, 2015. С. 200–207
26. *Витязев А.В., Печерникова Г.В.* К синтезу космохимического и динамического подходов в планетной космогонии // *Метеоритика*. 1985. Вып. 44. С. 3–20.
27. *Светцов В.В.* В развитие статистической модели образования Луны. II // *Динамические процессы в геосферах*. Сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 4, М.: ГЕОС, 2013. С. 66–73.
28. *Горькавий Н.Н.* Образование Луны и двойных астероидов // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* 2007. **103**, № 2. С. 143–155.
29. *Goldreich P.* History of the lunar orbit // *Revs Geophys.* 1966. **4**, 411. Русск. Приливы и резонансы в Солнечной системе. М.: Мир, 1975.
30. *Рускол Е.Л.* Приливная эволюция системы Земля–Луна // *Изв. АН СССР, серия геофиз.* 1963. № 2, 216.
31. *Маева С.В., Рускол Е.Л.* О тепловой истории Венеры // *Физика Земли*, 1977. № 4. С. 3–7.
32. *Burns J.A.* Where are the satellites of the inner planets? // *Nature Phys. Sci.*, 242, № 115. 1973.
33. *Spohn T.* Physics of Terrestrial Planets and Moons: An Introduction and Overview // *Treatise on Geophysics (Second Edition) / Ed. G. Schubert. V. 10: Physics of Terrestrial Planets and Moons.* 2015. P. 1–22.
34. *Breuer D., Moore W.B.* Dynamics and Thermal History of the Terrestrial Planets, the Moon, and Io // *Treatise on Geophysics (Second Edition) / Ed. G. Schubert. V. 10: Physics of Terrestrial Planets and Moons.* 2015. P. 255.

## *Chapter 10*

### **MODELS OF THE ORIGIN OF THE MOON; EARLY HISTORY OF EARTH AND VENUS (THE ROLE OF TIDAL FRICTION IN THE FORMATION OF STRUCTURE OF THE PLANETS)**

© **G.V. Pechernikova**<sup>1,2</sup>, **E.L. Ruskol**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Dynamics of Geospheres RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

An analytical review of the two contemporary models of the origin of the Earth–Moon system in the process of solid-body accretion is presented: so-called co-accretion model and as a result of a gigantic collision with a planetary-sized body (i.e. a megaimpact model). The co-accretion model may be considered as a universal mechanism of the origin of planetary satellites, that accom-

panies the growth of planets. We consider the conditions of this process that secure the sufficient mass and angular momentum of the protolunar disk such as macroimpacts (collisions with the bodies of asteroidal size) into the mantle of the growing Earth, the role of an lunar embryo growing on the geocentric lunar orbit, its tidal interaction with the Earth. The most difficult remains the explanation of chemical composition of the Moon. Different scenarios of megaimpact are reviewed, in which the Earth's mantle is destroyed and the protosatellite disk is filled mainly by its fragments.

There is evaluated amount of energy transferred to the Earth from the evolution of lunar orbit. It is an order of magnitude lower than three main sources of the Earth's interior heat, i.e. the heat of accretion, the energy of differentiation and the heat of radioactive sources. The tidal heating of the Venus's interiors could reach 1000K by slowing its axial initial rotation, in addition to three sources mentioned above in concern of the Earth.

## *Глава 11*

### **ПЕРВИЧНАЯ МЕТЕОРИТНАЯ БОМБАРДИРОВКА\***

© **А.В. Багров**

*Институт астрономии РАН,*

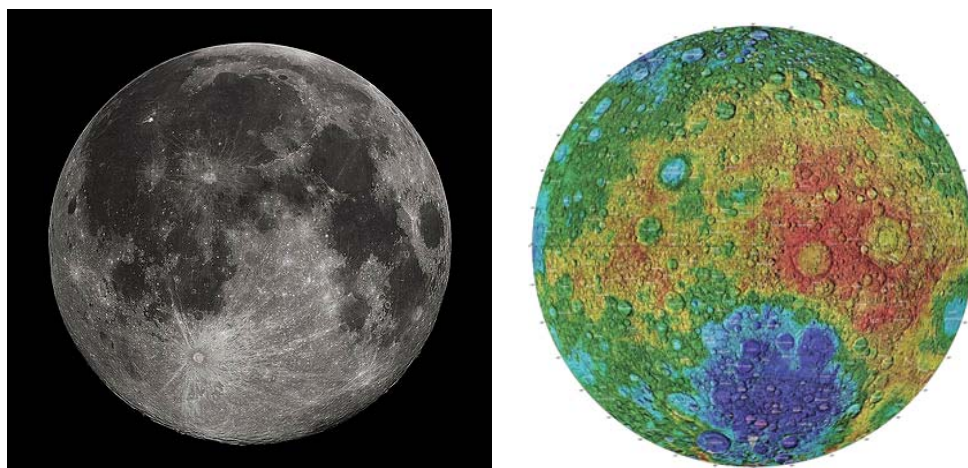
*Москва, Россия*

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,*

*г. Химки, Московская область, Россия*

В планетной космогонии термин «Начальная метеоритная бомбардировка» закрепился за гипотетическим периодом формирования планет в результате массового падения на их зародыши метеоритов. Однако это модельное представление не имеет никаких подтверждений. Единственные следы метеоритных ударов сохранились на поверхности уже сформировавшихся космических тел. Подавляющее число ударных кратеров на этих телах имеет возраст 4.5...3.7 млрд. лет, то есть сразу же после образования планет и становления Солнца как звезды. Трудно найти разумное объяснение тому положению современной космогонии, которое фактически утверждает, что в течение многих миллионов лет метеоритная бомбардировка наращивала размер космических тел и ударами расплавляла их поверхность, но потом у всех вдруг одновременно поверхность затвердела, чтобы сохранить ударные кратеры следующего этапа.

Темп появления новых кратеров за последние 3.5 млрд лет мало изменился. Он остается очень низким, поэтому начальный период существования Солнечной системы считается периодом «Великой» или «Первичной» метеоритной бомбардировки (Great Heavy Bombardment – GHB).



**Рис. 1.** Ударные кратеры на видимой (слева) и обратной (справа) стороне Луны.

---

\* Редакторы не разделяют уверенность автора в существовании планеты Фэтон. Но, поскольку эта работа была доложена на коллоквиуме, мы сочли возможным включить эту главу в дискуссионном порядке.

Датировка периода ГНВ основана на определении радиоизотопного возраста лунных образцов, которая совпадает с возрастом большинства собранных метеоритов. Продолжительность периода ГНВ определена по подсчету кратеров на Луне, где более древние кратеры перекрываются более молодыми. Изменение скорости кратерообразования на Луне со временем показано на рис. 2 [1]. Наиболее интенсивное образование кратеров приходится на самое начало ГНВ. Это означает, что уже после того, как планеты полностью сформировались, в Солнечной системе в очень короткое время возникло огромное количество ударников, которые за несколько сотен миллионов лет полностью израсходовались. Начальное количество ударников можно оценить через число кратеров на безатмосферных телах, по которым можно не только получить представление об их числе, но и об их размерах.

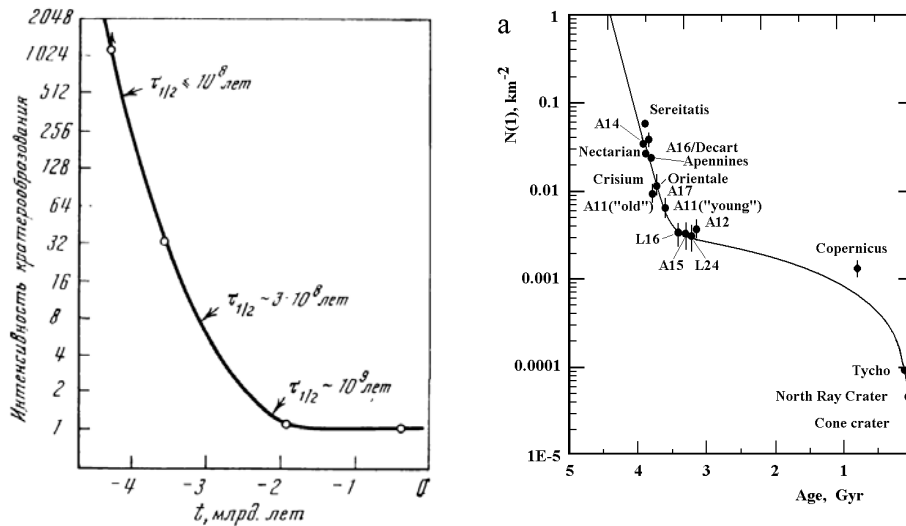


Рис. 2. Интенсивность кратерообразования на Луне [1].

Только на поверхности Луны выявлено около 15 тысяч ударных кратеров диаметром более 10 км, для образования которых ударники должны были иметь диаметр не менее 3 км. Для того чтобы остальные планеты имели пропорциональное их площади число ударников, оно должно было составлять несколько миллионов тел размером более 3 км. Число более мелких тел должно было исчисляться миллиардами.

Важно подчеркнуть, что именно в этот начальный период появились самые большие ударные кратеры на Меркурии (котловина Колорис) и на Луне (депрессия «Южный полюс – кратер Эткинс»). Косвенными признаками серьезных ударных столкновений других планет с космическими телами являются их ненулевые эксцентриситеты и наклоны осей их вращения относительно плоскости орбит, а также некоторая некомпланарность плоскостей орбит больших планет. Было бы интересно сравнить величину энергии, необходимой для придания наклона оси вращения планеты [2], с

энергией, необходимой для изменения ее орбиты с круговой (с радиусом, равным большой или малой полуосей) на наблюдаемую эллиптическую. Если бы они оказались сопоставимы, то это можно было бы трактовать как свидетельство ударного происхождения наклона вращения и эксцентриситета орбиты.

Согласно общепринятой теории происхождения планет, все планеты Солнечной системы аккумулялировали вещество первичного протопланетного диска; диск был плоский, поэтому плоскости всех планетных орбит тоже должны лежать в одной плоскости. Аккумуляция вещества диска должна была привести к формированию планет с круговыми орбитами, которые должны были иметь оси вращения, строго перпендикулярные плоскости первичного протопланетного диска (плоскостям орбит планет), и скорости осевого вращения, соответствующие моменту вещества из зоны питания планеты [3, 4]. Ударные взаимодействия в состоянии объяснить появление наклонений планетных орбит и наклонов осей их вращения. Доказательством того, что подобные ударные события происходили именно в ранний период существования Солнечной системы, является то, что у планет имеются регулярные спутники с общими свойствами. Их главная особенность – малый эксцентриситет орбит, расположенных в плоскости экватора планеты, ортогональность осей вращения плоскости орбиты и синхронность периодов их вращения и обращения, – находит свое объяснение в небесной механике. При наличии механизма диссипации энергии, всякое тело, находящееся на орбите вокруг массивного тела, в результате действия неупругих приливных сил, переходит на орбиту с отмеченными свойствами, чего не может быть при упругом взаимодействии без диссипации энергии.

Можно выделить два механизма диссипации энергии взаимного движения: а) движение сформировавшихся тел в вязкой газовой среде (протопланетный диск на 98% состоял из газов), и б) вязкое состояние вещества самого спутника. Газовая среда существовала только в протопланетном диске; после начала ядерных реакций в Солнце его звездная активность вымела газовую составляющую (как и некоагулированную первичную пыль протозвездного/протопланетного облака), поэтому период действия этого механизма мог иметь место только в самом раннем возрасте Солнечной системы. Второй механизм нуждается в объяснении природы вязкости вещества малых тел, - ведь оно должно было быть разогрето до температуры его плавления, хотя внутренних источников разогрева в телах малого размера и массы не могло быть.

Внезапное появление большого числа ударников в начальный период существования Солнечной системы остается камнем преткновения для общепринятой космогонии. Для объяснения этого явления привлекаются очень экзотические гипотезы, самой популярной из которых в последнее время стала концепция миграции больших планет [5, 6]. По мнению некоторых исследователей, орбиты больших планет в начальном периоде Сол-

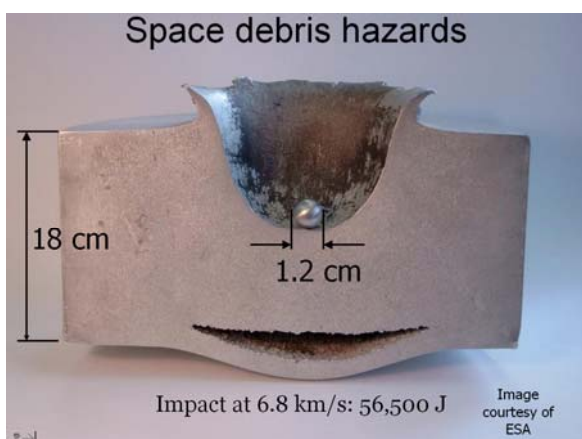
нечной системы были неустойчивы из-за своей эллиптичности, причем орбиты Юпитера и Сатурна имели близкие размеры больших полуосей. Взаимное гравитационное воздействие, согласно моделям, приводило к хаотизации орбит планетных «зародышей» и многочисленным столкновениям их между собой. При этом для того, чтобы Юпитер и Сатурн оказались на современных орбитах, приходится допустить, что обе планеты изначально образовались на нестабильных орбитах. Все модели эволюции планетной системы основаны на многих недостаточно обоснованных начальных условиях, которые играют роль свободных параметров для небесно-механических расчетов. Случайный подбор таких параметров может привести в моделях к достижению некоторых наблюдаемых характеристик Солнечной системы, но можно ли их считать реальными реконструкциями эволюции протопланетного диска, если исходные предположения вызывают сомнения? И можно ли предложить альтернативный взгляд на события GHB?

Все особенности GHB Солнечной системы можно легко объяснить, если вернуться к давней спорной гипотезе о разрушении планеты, которая должна была бы быть между орбитами Марса и Юпитера (безымянная «планета Ольберса», или Фаэтон, – по предложению С. Орлова [7]). Основным аргументом противников этой гипотезы сводился к непониманию механизма тотального разрушения целой планеты, и к идее О.Ю. Шмидта о том, что притяжение Юпитера могло не позволить сформироваться этой планете [8]. Оба эти положения теперь следует отнести к закрепившейся без доказательств традиции. В то же время математическое моделирование показало, что Юпитер своей гравитацией мог удалить из зоны питания Фаэтона вещество только в том случае, если бы оно оказывалось на расстоянии от 6 до 14 радиусов Юпитера от этой планеты [9]. То есть Юпитер не только не мог препятствовать формированию планеты, но и не мог удалить вещество протопланетного диска из зоны ее формирования. Во всяком случае, тяготение Юпитера в настоящее время в области Главного пояса астероидов может только выводить тела с резонансных орбит, поскольку вывод тела из резонанса делает его орбиту нерезонансной, а вековая эволюция вызывает только периодические изменения орбиты. Во всяком случае, пока неизвестно ни одного случая, чтобы какой-то астероид Главного пояса заметно изменил свою орбиту, а тем более – выброшен из Солнечной системы.

После открытия экзопланет и планет, покинувших родительскую звезду, становится очевидным, что в межзвёздном пространстве должно находиться множество менее крупных тел – планетезималей. Разрушение большой планеты в Солнечной системе легко объяснить её столкновением с «межзвёздным скитальцем»: кинетическая энергия тела с массой Луны при скорости столкновения 100 км/с превышает энергию гравитационной связи вещества планеты, подобной Земле.

Тела, потерянные другими звездами, при приближении к Солнцу должны набирать вторую космическую скорость, которая на расстоянии 1 а.е. от Солнца составляет 42 км/с, если их скорость определяется только притяжением Солнца. Скорость столкновения с планетой может быть выше или ниже этой скорости на величину орбитальной скорости планеты. В любом случае скорость ударника всегда существенно превышает скорость звука в материалах ударника и мишени. Теория гиперскоростных ударов пока еще только разрабатывается, хотя Hypervelocity Impact Society проводит каждые 2–3 года симпозиумы по этой тематике [10]. Экспериментальные подтверждения теоретических моделей гиперскоростных ударов появились совсем недавно [11].

В сильно упрощенной картине гиперскоростного удара в точке контакта мишени и ударника возникают напряжения, намного превышающие прочность обоих тел, что вызывает полное разрушение и испарение вещества в точке контакта. Между телами возникает газовая прослойка, которая с большой скоростью вытекает из ударного кратера и уносит с собой обломочный материал. Давление прослойки передается на оба тела. В мишени возникают упругие напряжения, распространяющиеся по ней со скоростью звука, а ударник под действием этого давления тормозится. Если энергия столкновения достаточно велика, то суммарная масса испаренного материала может в несколько раз превышать массу ударника, и он полностью испаряется. В результате удара прочного ударника по твердой мишени возникает ударный кратер (рис. 3. [11]), глубина и диаметр которого примерно одинаковы и значительно больше высоты кольцевого вала вокруг кратера. Эксперимент демонстрирует также, что в случае сопоставимости размеров мишени (толщины) и размеров кратера происходит отрыв дальней части ударника.



**Рис. 3.** Разрез мишени из алюминия после удара по ней стальным шариком на скорости 6.8 км/с [11].

Если принять гипотезу ударного разрушения Фэтона, то планета, состоящая, подобно Земле, из расплавленного вещества недр под тонкой твердой корой, при гиперскоростном ударе должна была быть «разбрызгана» по всей Солнечной системе давлением испарившегося при ударе веще-

ства. Остатки внутренних расплавленных частей Фэтона не могли сильно ускориться давлением газов, и должны были остаться вблизи орбиты разрушенной планеты (конкретно – в Главном поясе астероидов). Часть фрагментов приобрела высокую скорость и могла оказаться во внешних частях Солнечной системы, а другая часть, потеряв скорость, могла выпасть на Солнце или сформировать систему АСЗ (астероидов, сближающихся с Землей).

Высокая пространственная плотность летящих во всех направлениях фрагментов Фэтона неизбежно должна была приводить к их взаимным столкновениям. В отличие от первичных планетезималей, находящихся на непересекающихся гелиоцентрических орбитах, траектории разлетающихся частиц после взрыва имеют хаотическое распределение по направлению и большую дисперсию по скорости. Взрыв Фэтона, таким образом, очень просто объясняет одновременное появление огромного числа разлетающихся в разные стороны ударников. Результатом такого разлёта являются многочисленные столкновения фрагментов и вызванные ими кратеры на астероидах и планетах.

Поскольку почти все выброшенное из Фэтона вещество было вязким и полурасплавленным, взаимные столкновения фрагментов могли не сопровождаться их разрушением. Среди сфотографированных космическими миссиями астероидов есть такие, у которых размер ударного кратера сопоставим с размером самого астероида; только соударение двух вязких тел могло образовать кратер и не разрушить эти тела. Примером может быть астероид 253 Матильда (рис. 4), на теле которого есть три гигантских кратера с диаметрами, сопоставимыми с размером самого астероида!



**Рис. 4.** Астероид 253 Mathilde [12].

Многочисленные столкновения фрагментов в период их высокой пространственной плотности могут объяснить еще одно странное свойство многих астероидов – наличие у них спутников. Небесная механика в рамках классической задачи двух тел категорически отрицает возможность захвата одним телом другого при близком пролете. Требуется наличие третьего тела, которое в момент сближения изменит их взаимную скорость. Так вот, если во время сближения двух тел одно из них испытает столкно-

вение с третьим, то условия для захвата будут выполнены. У этого механизма есть и обратная сторона: астероид со спутником, испытав соударение с метеоритом, может приобрести в результате столкновения энергию, превышающую энергию его гравитационной связи со спутником, и утратить его. Поэтому существование большого количества двойных астероидов с многочисленными ударными кратерами на поверхности, свидетельствует о том, что период взаимных столкновений астероидов был очень коротким, и полностью прекратился вскоре после формирования астероидов.

Кстати, стоит отметить, что весьма популярная гипотеза о том, что астероиды в результате взаимных столкновений представляют собой «груды камней», никак не в состоянии объяснить облик астероида Матильда, который по этой гипотезе должен был бы «запоминать» кратеры от предыдущих столкновений при новых соединениях камней «под действием взаимного притяжения». А существование двойных астероидов с ударными кратерами на поверхности вообще не допускает сколь либо заметного числа столкновений астероидов после их отвердевания и удаления газа из протопланетного диска.

Помимо того, что гипотеза разрушения Фэтона способна объяснить мгновенное появление огромного количества ударников и протекание ГНВ, она позволяет разрешить загадочное происхождение Луны. Совместное происхождение Земли и Луны вблизи друг друга [1] не может объяснить различия в их составе, а именно, сходство основного материала Луны с силикатной корой Земли и недостаток в Луне железа. Гипотеза «мегаимпакта», предполагающая, что Луна образовалась в результате выброса в космос части земной коры в результате столкновения Земли с гипотетической планетой Тейя [13], сталкивается с очень большими трудностями с точки зрения небесной механики. Попытки поправить положение концепции мегаимпакта рассмотрением серии более «мелких» мегаимпактов [14], практически его не поправила [15], а недавно вся эта распространенная концепция была поставлена под сомнение [16]. В рамках гипотезы о разрушении Фэтона можно предположить, что, подобно отрыву дальнего края мишени на рис. 3, противоположная месту удара часть Фэтона отделилась массивным фрагментом, получив ощутимый дополнительный импульс. Поскольку практически весь материал фрагмента представлял собой расплавленную мантию, собственное тяготение быстро привело к приобретению им сферической формы и кристаллизации внешнего слоя, хотя при малой теплопроводности силикатов внутренние части фрагмента еще долго оставались расплавленными.

На новой гелиоцентрической орбите отделившийся фрагмент мог близко подходить к земной орбите. В задаче двух тел однозначно показано, что даже при близком прохождении невозможен захват одного тела другим. Для захвата необходимо, чтобы проходящее тело потеряло часть

своей кинетической энергии. Во время ГНВ для этого было много возможностей в виде разлетевшихся осколков Фаэтона. Есть основания считать, что столкновение с очень крупным телом «притормозило» протолуну вблизи Земли, и сделало ее Луну. Свидетельством такого удара является огромный кратер-депрессия «Южный полюс – кратер Эткинс» (рис. 1), названный в публикации [17] «Orientale basin». Схема кратера приведена на рис. 5 [17].

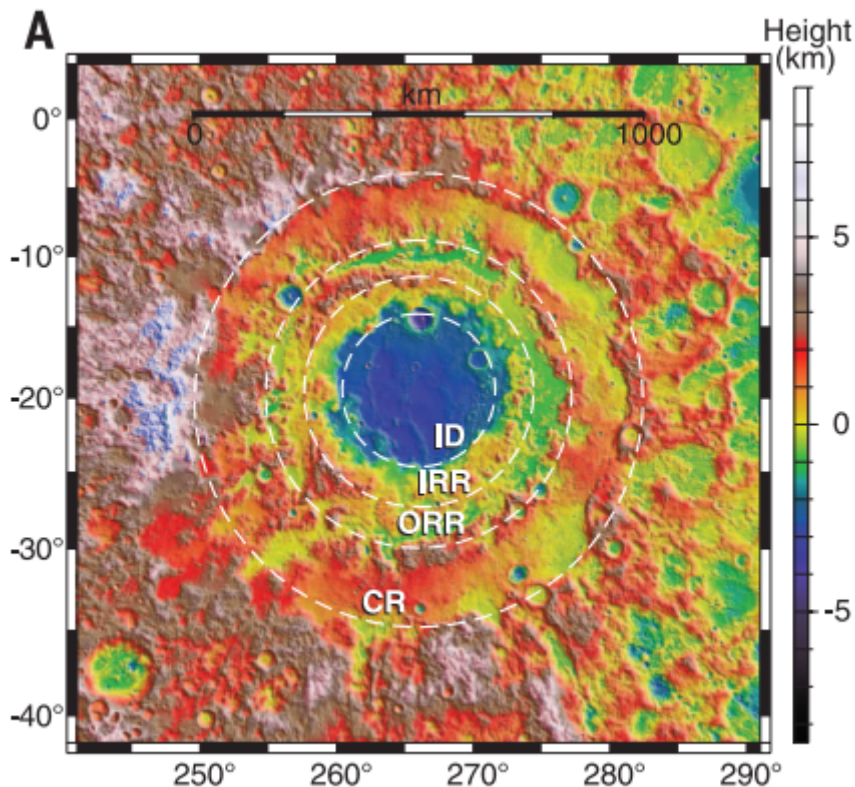


Рис. 5. Самый большой ударный кратер на Луне – «Orientale basin» [17].

В случае столкновения двух тел возле третьего могут выполняться необходимые для захвата условия. Оказавшаяся на околоземной орбите Луна испытывала сильные приливные воздействия со стороны Земли и Солнца. Приливное трение в вязком расплавленном веществе лунных недр привело к трем следствиям: орбита Луны стала близкой к круговой, плоскость орбиты приблизилась к плоскости эклиптики, а период вращения Луны вокруг оси сравнялся с периодом ее обращения вокруг Земли. Описанная концепция появления у Земли спутника не противоречит законам небесной механики. В предположении, что планета Фаэтон была по космохимическому составу близка к Земле, гипотеза объясняет сходство лунных пород с корой Земли и недостаток в Луне железа. Однако, детальное рассмотрение особенностей строения и химического состава Луны, не зависящих от механизма ее образования, требует продолжения исследований.

Обычно под «первичной астероидной бомбардировкой» понимается только период интенсивного кратерообразования на телах Солнечной системы. Но проблему можно поставить гораздо шире, если рассмотреть происходившие изменения в тот же период с орбитами и вращением больших планет [18]. Небольшие фрагменты Фазтона не могли своими ударами привести к изменениям наклонов осей вращения планет. Причиной этих изменений могли быть удары «межзвездных скитальцев». Солнечная система образовалась, подобно многим другим звездным системам, в плотной зоне звездообразования, в которой пространственная плотность звезд была в десятки раз выше той, в которой сейчас находится Солнце. При высокой плотности звезд условия для убегания из области их притяжения планетезималей тоже были благоприятными, «межзвездных скитальцев» было много, и вероятность их столкновения с большими планетами Солнечной системы тоже была заметно выше, чем теперь.

Существует еще один класс малых тел Солнечной системы, изучение которого может подтвердить гипотезу об ударном разрушении Фазтона, — это метеорное и метеоритное вещество. В рамках гипотезы о разрушении Фазтона было высказано предположение, что выброшенные из точки взрыва расплавленные фрагменты под действием давления растворенных в их веществе газов могли дробиться и вспениваться, продолжая движение компактными роями. Эти рои, выброшенные в периферийные области протопланетного диска, могли там обрастать снегом из замороженных летучих, еще не успевшим объединиться в планетезимали. Под действием взаимного тяготения, эти рои могли объединяться в более крупные тела, становясь кометными ядрами «второго поколения»: в отличие от первичных планетезималей они содержат частицы тугоплавкого вещества, прошедшие стадию плавления [19]. Если такие тела в какой-то момент перейдут на орбиты с малым апогелийным расстоянием, то солнечная радиация испарит летучие из кометного ядра, а на орбите бывшей кометы останутся рои метеорного вещества. Свойства этих метеорных частиц могут быть изучены.

Хотя пока нет бесспорных доказательств, что метеориты являются выпавшими на Землю частицами из метеорных потоков (метеоритика и метеорная астрономия еще не накопили достаточного материала для подобного вывода), возраст метеоритов предлагает интересную тему для размышлений. Радиоизотопный возраст всех найденных когда-либо метеоритов, соответствующий давности затвердевания их вещества, составляет 3,5 ... 4,5 миллиардов лет. При этом «экспозиционный» возраст тех же метеоритов, показывающий, сколько времени метеоритные частицы провели в открытом космосе и облучались космическими лучами, составляет только миллионы лет. Это странное противоречие можно объяснить, если предположить, что в течение долгого времени метеоритное вещество было укрыто от космических лучей внутри кометного ядра. В 2013 году в Чебаркуле (Челябинская обл.) выпал метеоритный дождь из тысяч хондри-

тов, включая почти полутонный метеорит. Наверное, это первый в истории случай наблюдавшегося столкновения с Землей небольшого осколка кометного ядра [20], который дает возможность проверить высказанное предположение. Если Чебаркульский метеорит был разрушен в атмосфере хондритом [21], то экспозиционный возраст отдельных метеоритов будет различаться в зависимости от того, был ли в космосе кусочек на поверхности или в глубине тела, а если все метеоритные частицы находились внутри кометного ядра, то разницы в экспозиционных возрастах не должно быть.

Современные методы метеорных исследований уже позволяют получить представление о физических свойствах метеорных частиц. Метеорная группа ИНАСАН ставит задачу определить, являются ли все метеорные частицы одного потока телами одного химического состава и одинаковой плотности, или нет. Эти исследования позволят установить, насколько однородно вещество в отдельном метеорном потоке, и может ли оно происходить из общего роя фрагментов Фаэтона, и, тем самым, получить дополнительный аргумент в пользу гипотезы о взрыве Фаэтона как источнике тел GNB.

#### Литература

1. *Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975.
2. *M.G. Paris.* Last giant impact on Uranus (Research Note). Constraints on oligarchic masses in the trans-Saturnian region // *Astronomy&Astrophysics*, 534, A28 (2011).
3. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука. 1969.
4. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990, 296 с.
5. *Kevin J. Walsh<sup>1</sup> and Alessandro Morbidelli<sup>1</sup>.* The Effect of an Early Planetesimal-Driven Migration of the Giant Planets on Terrestrial Planet Formation // arXiv:1101.377v1 [astro-ph.EP] 19 Jan 2011.
6. *R. Gomes, H.F. Levison, K. Tsiganis & A. Morbidelli.* Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets // *Nature*, Vol. 435. 26 May 2005. p. 466–469. doi:10.1038/nature03676
7. *Орлов С.В.* Астероиды и метеориты // *Метеоритика*, 1949. т. 5, с. 3–13.
8. *Шмидт О.Ю.* Четыре лекции о теории происхождения Земли. 2-е издание Из-во АН СССР, 1950.
9. *А.В. Багров, Н.А. Сорокин.* Долговременная стабильность астероидных орбит / Труды международной конференции "Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты" // Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. с. 113-114.
10. Guidelines for The Hypervelocity Society Officers and Committee Chairs (2002). URL: [http://www.hvis.org/docs/HVISGuidelines\\_v02.pdf](http://www.hvis.org/docs/HVISGuidelines_v02.pdf)
11. EuroTech, 2012. European Union Unveils Extraterrestrial Code Of Conduct URL: <https://plus.google.com/118292867302583509179/posts/ETfqqtMxAyv>
12. *Cheng, Andrew F.* (2004). Implications of the NEAR mission for internal structure of Mathilde and Eros. *Advances in Space Research* **33** (9): 1558–1563. doi:10.1016/S0273-1177(03)00452-6

13. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы. Наука. М.: 1990. С. 200–201.
14. *Gorkavii, N.N.* The New Model of the Origin of the Moon // *Bulletin Amer. Astron. Soc.* 2004. Vol. 36, № 2.
15. *Pahlevan, K. & Stevenson, D.J.* Equilibration in the aftermath of the lunar-forming giant impact. *Earth Planet. Sci. Lett.* 262, 438–449 (2007).
16. *Junjun Zhang et al.* The proto-Earth as a significant source of lunar material. // *Nature Geoscience* 5, 251–255 (2012). doi:10.1038/ngeo1429
17. *Zuber M.T. et al.* Gravity field of the Orientale basin from the Gravity Recovery and Interior Laboratory Mission. // *Science* 28 October 2016. Vol. 354, Issue 6311
18. *Багров А.В.* Планета Ольберса: история, действительно продолжается // *Историко-астрономические исследования*, т. 28. 2002.
19. *А.В. Багров.* Два поколения кометных ядер и наблюдательные различия в последствиях их распада. / *Околоземная Астрономия – 2003. Труды конференции.* Т. 1. Терскол, 8–13 сент. 2003 // *Институт астрономии РАН. СПб: ВВМ, 2003.* с. 125–133.
20. *Багров А.В., Леонов В.А., Попеленская Н.В.* Исследование структуры и состава тела челябинского болида / *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / [редкол.: Н.А. Антипин и др.; сост. Н.А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 310–319. ISBN 978-5-905081-09-5.*
21. *O.P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova et.al.* Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization // *Science* 342, 2013, 342, pp. 1069–1073.

*Глава 12*

**ДОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ  
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ**

© **Д.З. Вибе**

*Институт астрономии РАН,  
Москва, Россия*

Одним из знаменательных открытий XX века стало обнаружение межзвёздных молекул. Вначале (с конца 1930-х годов) известны были только простые двухатомные соединения. Однако послевоенное развитие радиоастрономии позволило существенно расширить этот список, и в настоящее время количество известных межзвёздных и околозвёздных молекул приближается к двум сотням (без учёта изомеров и изотопомеров). Среди них встречаются как простые, так и довольно сложные соединения: самые большие уверенно идентифицированные молекулы состоят из 12 атомов ( $\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5$ ,  $\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$ ). Практически все молекулы с числом атомов 5 и более относятся к органическим соединениям различных видов. Неоднократно сообщалось об обнаружении в межзвёздной среде простейшей аминокислоты – глицина. И хотя позже эти сообщения опровергались, не сомнения, что проблема является чисто технической; никаких принципиальных преград на пути межзвёздного синтеза простейших аминокислот нет. В межзвёздной среде, несомненно, присутствуют и более сложные органические структуры – фуллерены, какие-то формы ароматических соединений. В последнее время это разнообразие всё чаще становится поводом для предположения о том, что органические соединения могли попадать на Землю (и другие формирующиеся планеты) в «готовом» виде. Однако необходимо помнить, что и в межзвёздной среде, и в окрестностях формирующихся звёзд, и непосредственно в протопланетных дисках действуют многочисленные факторы, способствующие эффективному разрушению молекул.

Первые признаки существования молекул за пределами Земли были отмечены итальянским астрономом Джованни Донати [1]. Наблюдая в августе 1864 года комету, открытую незадолго перед этим немецким художником и астрономом Эрнстом Темпелем, Донати при помощи самодельного спектроскопа увидел в спектре кометы три ярких детали, которые напомнили ему спектры металлов. Расшифровать подлинную природу этих деталей удалось десятью годами позже благодаря Уильяму Хеггинсу [2]. Он сам наблюдал спектры нескольких комет и убедился, что яркие полосы (которые иногда удавалось разрешить на отдельные линии) являются неизменным атрибутом кометных спектров. В работе [2] Хеггинс связал их происхождение с наличием в комете соединений углерода с водородом или азотом.

Возможность существования молекул не только в межпланетном, но и межзвёздном пространстве начала обсуждаться существенно позже. Изначально считалось, что в силу малой плотности межзвёздного вещества и наличия диссоциирующего излучения образование в нём молекул невозможно. Однако в 1937 году Артур Эддингтон отметил [3], что наличие в межзвёздной среде (МЗС) водорода приведёт к поглощению значительной

части ионизирующих квантов, и потому атомы основных элементов (Н, О, N и др.) в облаках межзвёздного вещества будут нейтральны и смогут объединяться в молекулы. Важным толчком к исследованию формирования молекул в МЗС стало обнаружение диффузных межзвёздных полос [4]. Наконец, в конце 1930-х годов были найдены межзвёздные полосы поглощения, которые в 1940–1941 гг. были идентифицированы как полосы молекул  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}^+$  и  $\text{CN}$  [5, 6].

В это же время подтвердилось предположение о наличии в МЗС большого количества водорода. В 1938 году Струве и Элви [7] обнаружили в созвездиях Лебедя и Цефея обширные области, излучающие в балмеровской линии водорода  $\text{H}\alpha$ . Предварительные оценки показали, что содержание водорода в этих областях как минимум в 100 раз превосходит содержание кальция. Наблюдавшаяся в работе [7] линия  $\text{H}\alpha$  и другие подобные линии являются *рекомбинационными*: они возникают при рекомбинации электрона на один из верхних уровней атома водорода и последующих переходах на более низкие уровни. Поскольку рекомбинация должна предшествовать ионизации, рекомбинационные линии возникают в так называемых зонах ионизованного водорода — областях МЗС, непосредственно окружающих горячие массивные звёзды. Это означает, что в наблюдениях линии  $\text{H}\alpha$  можно увидеть далеко не весь межзвёздный водород.

Прорывом в исследовании межзвёздного вещества стало обнаружение линии водорода на длине волны 21 см [8], которое стало возможным в эпоху послевоенного расцвета радиоастрономии. Наблюдения в радиодиапазоне показали, что водород является не просто основным, но подавляющим компонентом межзвёздного вещества, масса которого составляет заметную долю (порядка нескольких процентов) от полной массы галактического диска. Обнаружение значительных количеств водорода подтвердило, что существенная доля объёма МЗС действительно защищена от ионизирующего и диссоциирующего излучения и в ней могут существовать не только нейтральные атомы, но и молекулы.

В первых моделях образование молекул в МЗС связывалось с реакциями *радиативной ассоциации* (радиационного захвата). Столкновение двух атомов само по себе не способно привести к образованию молекулы, однако в ряде случаев в процессе столкновения формируется столкновительный комплекс, который успевает до распада излучить избыток энергии в виде фотона и тем самым превратиться в стабильную молекулу. Поскольку список межзвёздных молекул включал поначалу только три наименования, сетки реакций, основанные на реакциях радиативной ассоциации, тоже были очень простыми [9]. Однако уже в 1951 году было показано [10], что в ранних расчётах скорости этих реакций были существенно переоценены и построенные на них сетки недооценивают наблюдаемые содержания межзвёздных молекул на порядки величины.

Появилась необходимость в новых объяснениях синтеза межзвёздных молекул. Предлагались такие варианты, как, например, синтез молекул на поверхностях космических пылинок с последующим испарением, фотодиссоциация сложных молекул, испаряющихся из углеводородных пылинок, синтез молекул в проэволюционировавших звёздах с последующим выбросом в МЗС.

Ситуация усугубилась после того, как начались радионаблюдения межзвёздных молекул. Линии видимого и ультрафиолетового диапазона (как атомарные, так и молекулярные) связаны с электронными переходами, однако в молекулах существуют дополнительные степени свободы, например, колебательные и вращательные. Энергии колебательных и вращательных состояний также квантованы, однако разности энергий различных уровней малы, и потому соответствующие переходы попадают в инфракрасный диапазон (в случае колебательных переходов) или в субмиллиметровый и радиодиапазон (в случае вращательных переходов).

На возможность наблюдать радиоизлучение молекул И.С. Шкловский указывал ещё в 1949 году [11], однако первое обнаружение молекулы в радионаблюдениях случилось только в 1963 году [12], когда в спектре остатка сверхновой Cas A была замечена линия поглощения гидроксила (ОН) на длине волны 18 см. В конце 1960-х было обнаружены и эмиссионные линии, принадлежащие молекулам аммиака, воды и формальдегида. Формальдегидом открылся список межзвёздной органики, в 1970–1971 гг. пополнившийся метанолом, метилцианидом ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), цианоацетиленом ( $\text{HC}_3\text{N}$ ), муравьиной кислотой, формамидом ( $\text{NH}_2\text{CHO}$ ) и другими.

В 1970 году [13] подтвердилось также предположение, высказанное за 15 лет до этого [14], что основным молекулярным компонентом МЗС должен быть молекулярный водород,  $\text{H}_2$ . Однако молекула водорода в силу своей симметрии лишена переходов, которые эффективно излучали бы в условиях молекулярной межзвёздной среды, и потому о распределении молекулярного вещества в нашей Галактике и в других галактиках нам приходится судить по вторичным индикаторам. Основным индикатором наличия молекулярного газа считается сейчас излучение молекулы СО, впервые обнаруженное также в 1970 году [15].

Излучение вращательных переходов (1–0) и (2–1) молекулы СО приходится на длины волн 2.6 мм и 1.3 мм, соответственно. Оно хорошо наблюдается с поверхности Земли и, будучи достаточно ярким, не требует для наблюдений телескопов с большой собирающей поверхностью. Картирование Галактики в линиях оксида углерода показало, что молекулярное вещество распределено в галактическом диске крайне неравномерно: оно собрано в облака с температурой порядка 100 К и ниже и концентрацией порядка  $100 \text{ см}^{-3}$  и выше. Суммарная масса молекулярного газа в нашей Галактике составляет несколько миллиардов масс Солнца (примерно половина всей массы межзвёздного вещества); при этом занимают они не более

нескольких процентов объёма галактического диска [16]. Наибольшие массы (миллионы солнечных масс) характерны для гигантских *молекулярных облаков*. Из-за значительного содержания космической пыли внутренние области молекулярных облаков экранированы от ультрафиолетового и видимого излучения звёзд Галактики, что и создаёт в них благоприятные условия для синтеза наблюдаемых молекул.

В настоящее время в молекулярных облаках и околозвёздной среде обнаружено более полутора сотен различных молекул (без учёта изомеров и изотопомеров). Очевидно, что перечисленных выше механизмов недостаточно для объяснения этого разнообразия. По современным представлениям, ключевую роль в межзвёздной молекулярной химии играют *ион-нейтральные* (или ион-молекулярные) реакции, то есть реакции между ионизованным и нейтральным реагентами, а первичную ионизацию обеспечивают частицы космических лучей [17, 18]. При этом все реакции являются только двухчастичными; вклад трёхчастичных реакций становится существенным при концентрациях выше  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Роль космических лучей состоит в том, что они ионизуют наиболее обильные простейшие компоненты среды: молекулу водорода и атомы основных примесных элементов (O, C, N). Причём ионизованная молекула водорода быстро реагирует с нейтральной молекулой водорода с образованием иона  $\text{H}_3^+$ , который и является фактическим продуктом ионизации  $\text{H}_2$ . Далее начинает действовать цепочка, схематически показанная на рис. 1.

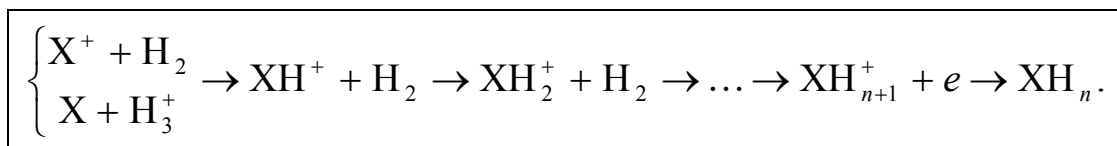


Рис. 1.

В реакции иона примесного атома  $\text{X}^+$  с молекулой  $\text{H}_2$  или нейтрального примесного атома  $\text{X}$  с ионом  $\text{H}_3^+$  образуется ион  $\text{XH}^+$ . Он реагирует с молекулой  $\text{H}_2$ , последовательно превращаясь в ионы  $\text{XH}_2^+$ ,  $\text{XH}_3^+$  и т. д. Заключительная реакция в этой цепочке — реакция с электроном — называется реакцией *диссоциативной рекомбинации*. Последний ион в цепочке рекомбинирует с электроном и превращается в насыщенную водородом молекулу — молекулу воды в случае кислорода, метана в случае углерода, аммиака в случае азота и т. д.

Конечно, в реакцию диссоциативной рекомбинации могут быть вовлечены и промежуточные ионы, а продуктом рекомбинации последнего иона в цепочке могут быть и ненасыщенные молекулы. Например, в кислородной цепочке рекомбинация ионов  $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$  приводит к появлению в среде не только воды, но и гидроксила.

Если говорить точнее, указанная простая схема реализуется только в случае кислорода. Углерод, обладающий наименьшим потенциалом иони-

зации среди наиболее распространённых атомов, в МЗС в значительной степени ионизован, что снижает роль реакции  $C + H_3^+ \rightarrow CH^+ + H_2$ . Реакция  $C^+ + H_2$  является реакцией радиативной ассоциации, сразу приводящей к образованию иона  $CH_2^+$ , и потому обладает невысокой скоростью. Ещё одна медленная реакция в углеродной цепочке — это реакция радиативной ассоциации  $CH_3^+ + H_2 \rightarrow CH_5^+$ . Её невысокая скорость приводит к накоплению в среде иона  $CH_3^+$ , играющего важную роль в дальнейшем органическом синтезе.

В целом, относительно невысокие скорости ряда ключевых реакций углеродной цепочки приводят к тому, что атомы и ионы углерода успевают прореагировать с гидроксидом, эффективно переходя в состав молекулы оксида углерода. Этим и обусловлена возможность использования излучения CO в качестве индикатора наличия молекулярного газа. Эффективность образования этой молекулы столь высока, что ней оказываются связанными почти все пары атомов углерода и кислорода, что делает оксид углерода самой распространённой молекулой после  $H_2$ .

Инициирование химии азота также происходит медленно. Скорость реакции  $N + H_3^+$  настолько мала, что ею часто вообще пренебрегают, а реакция  $N^+ + H_2$  обладает тепловым барьером 85 К, что в холодных молекулярных облаках существенно снижает её скорость. Из-за этого атомарный азот вступает в реакции с радикалами OH и CH, переходя в молекулы NO и CN. Эти молекулы также реагируют с атомами азота, что приводит к образованию молекулярного азота, который в молекулярных облаках является основным азотсодержащим соединением. К сожалению, молекула  $N_2$ , как и молекула  $H_2$ , в молекулярных облаках ненаблюдаема.

В ходе описанных процессов среда обогащается простыми молекулами, которые далее начинают вступать в реакции друг с другом. Например, реакция иона углерода с радикалом CH инициирует цепочку процессов, приводящую к синтезу молекулы ацетилена. Диссоциативная рекомбинация иона  $CH_3^+$  производит молекулу  $CH_2$ , которая, реагируя с атомом азота, превращается в молекулу HCN. Ион-нейтральная реакция молекулы водорода с ионом  $HCO^+$  (промежуточным продуктом цепочки синтеза CO) приводит к формированию иона  $H_3CO^+$ , который через диссоциативную рекомбинацию превращается в формальдегид.

Цепочки ион-нейтральных реакций с ионом  $CH_3^+$ , как уже говорилось, инициируют формирование ещё более сложных молекул [19]. Например, реакции этого иона с аммиаком приводят к синтезу метиламина; реакции с HCN стимулируют формирование метилцианида; реакции с формальдегидом обогащают среду уксусным альдегидом и т. п.

Однако не все реакции с ионом  $CH_3^+$  оправдали возложенные на них надежды. Одной из таких реакций оказалась реакция синтеза метанола. Предполагалось, что сначала реакция между  $CH_3^+$  и водой приводит к формированию протонированного метанола ( $CH_3OH_2^+$ ), который затем в

результате диссоциативной рекомбинации превращается в обычный метанол. Однако эксперименты показали, что диссоциативная рекомбинация  $\text{CH}_3\text{OH}_2^+$ , во-первых, идёт очень медленно, во-вторых, лишь в 3% случаев приводит к синтезу метанола. В остальных случаях ион  $\text{CH}_3\text{OH}_2^+$  диссоциирует на другие фрагменты. Поскольку метанол наблюдается в очень многих объектах и обладает достаточно высоким содержанием, необходимо искать другой путь к его синтезу.

Таким альтернативным путём стали реакции на поверхности космических пылинок. Собственно говоря, их пришлось включить в химические модели по куда более существенной причине: в описанной выше картине отсутствует формирование молекулярного водорода! Дело в том, что газофазные реакции синтеза  $\text{H}_2$  очень медленны, и характерное время молекуляризации водорода посредством этих реакций существенно превосходит время жизни молекулярных облаков. Альтернативой стало предположение о поверхностном синтезе  $\text{H}_2$ . Атомы водорода, осаждающиеся на поверхность пылинки, диффундируют по ней в результате тепловых движений и могут иногда встречаться друг с другом и объединяться в молекулу  $\text{H}_2$ . Энергия, выделяющаяся в этой реакции, отрывает молекулу от пылинки и переводит её в газовую фазу.

Логично предположить, что реакция образования молекулы водорода – не единственный поверхностный процесс. Другие молекулы также аккрецируют на поверхности пылинок и могут участвовать в химических реакциях. Поскольку наиболее подвижным поверхностным компонентом является атомарный водород (в силу минимальной массы), основной вид поверхностных реакций – это реакции добавления водорода. В частности, последовательное добавление несколько атомов H к молекуле оксида углерода приводит к синтезу метанола. К другим продуктам поверхностных процессов относятся формальдегид, этанол, диметиловый эфир, муравьиная кислота и пр.

В целом, описанная теоретическая картина неплохо согласуется с наблюдениями газофазных молекул, хотя следует помнить, что для объяснения наблюдений известных молекул приходится предполагать наличие существенно большего количества неизвестных молекул. В частности, в первой подобной модели [18] рассматривалась эволюция 37 компонентов, хотя известно их в то время (в 1973 году) было всего пять. Ключевой компонент ион-нейтральной химии — ион  $\text{H}_3^+$  — использовался в моделях с 1973 года, а обнаружен был только в 1995 году.

Куда хуже обстоит дело с проверкой результатов поверхностной химии. К сожалению, наблюдать поверхностные компоненты можно только по полосам поглощения в ближнем ИК-диапазоне. Это сложно, во-первых, потому что для наблюдений нужен хороший фоновый инфракрасный источник, найти который весьма непросто. Во-вторых, в ближнем ИК-диапазоне доминируют сильные полосы водяного льда и силикатная особен-

ность на 10 мкм, что затрудняет идентификацию других полос. Самой сложной молекулой в твёрдой фазе, уверенно отождествлённой по наблюдениям в ИК-диапазоне, является метанол [20].

Возможность косвенной проверки поверхностной химии появляется в окрестностях молодых звёздных и протозвёздных объектов, которые разогревают окружающее вещество молекулярного облака, испаряют ледяные мантии пылевых частиц и переводят продукты поверхностного синтеза из твёрдой в газовую фазу, где их снова можно относительно просто наблюдать. Именно в таких объектах (так называемых «горячих ядрах» и «горячих ядрышках») в настоящее время обнаруживаются наиболее сложные молекулы, предположительно испарившиеся с поверхностей пылинок [21, 22] или являющиеся продуктами дальнейших химических превращений этих молекул. Недавним примером сложности органических соединений, синтезируемых в областях звездообразования, может служить хиральная молекула оксида пропилена [23].

Неоднократно сообщалось даже об обнаружении в молекулярных облаках простейшей аминокислоты – глицина. В дальнейшем все такие сообщения так или иначе оспаривались, однако это отражает скорее технические проблемы, так как никаких принципиальных препятствий на пути к синтезу глицина нет. Технические же трудности состоят в том, что чем сложнее молекула, тем больше у неё переходов. Для уверенной идентификации желательно наблюдать как можно больше линий, убедившись, что нужные линии присутствуют в спектре и обладают «правильными» отношениями интенсивностей. Задача отождествления сталкивается с несколькими существенными трудностями.

Во-первых, молекул много, а это означает, что в реальных спектрах мы имеем дело не с набором линий одной молекулы, а с наборами линий десятков молекул. Кроме основных молекул наблюдаются также их изотопомеры, то есть молекулы, в которых основной изотоп какого-либо элемента (или элементов) замещён неосновным изотопом (например,  $^{13}\text{C}$  вместо  $^{12}\text{C}$ ). Линии изотопомеров несколько смещены по отношению к линиям основной молекулы, что также усложняет работу с ними.

Во-вторых, атмосферное пропускание делает невозможными наблюдения с Земли значительных участков спектра инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов. Это означает, что мы не имеем доступа к значительному объёму спектральной информации, необходимой для уверенного отождествления линий. Наблюдения из космоса пока, к сожалению, весьма и весьма ограничены.

В-третьих, необходимые теоретические и лабораторные данные о спектрах некоторых молекул просто отсутствуют. Например, в спектральном обзоре объекта Orion KL [24] в диапазоне 80–280 ГГц было выявлено 14400 линий. До 2005 года 8000 линий из этого списка оставались неотожествлёнными. После получения лабораторных данных о спектрах изото-

помера  $^{13}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$  молекулы  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ , изотопологов  $^{13}\text{C}$  молекулы  $\text{HCOOCH}_3$  и изотополога  $\text{CH}_3\text{OCOD}$  было отождествлено сразу 1400 линий.

Значительные проблемы связаны также и с теоретической интерпретацией результатов наблюдений. С математической точки зрения задача сводится к решению уравнений химической кинетики, в которых коэффициенты скоростей зависят от внешних условий (температуры, давления, поля излучения, потока космических лучей и пр.) и записываются при помощи той или иной параметризации. Например, для двухчастичных реакций (например, ион-нейтральных) используется модифицированное уравнение Аррениуса в виде

$$k = \alpha \left( \frac{T}{300\text{K}} \right)^\beta \exp(-\gamma / T),$$

где  $T$  – температура газа, а  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – некоторые параметры.

Значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  собраны в астрохимических базах данных, среди которых в настоящее время наиболее распространены базы UDFA [25] и KIDA [26]. Обе базы включают в себя информацию о нескольких тысячах реакций, связывающих порядка 500 компонентов (опять же число компонентов в модели существенно превышает наблюдаемое). Для составления этих баз данных использовались самые разнообразные источники – экспериментальные измерения, теоретические расчёты, приблизительные оценки и пр. Для значительного количества реакций величины  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  известны с невысокой точностью, что приводит к существенной неопределённости в результатах моделирования. Как было показано в работе Васюнина и др. [27], в ряде случаев погрешность теоретических содержаний молекул из-за неточного знания параметров реакций может превышать три порядка величины, и эта погрешность наиболее велика для сложных органических молекул.

Тем не менее, несмотря на все сложности, можно сказать, что в настоящее время мы имеем адекватное представление об основных химических процессах в межзвёздной среде, в том числе, о процессах синтеза сложных органических соединений, и существующие неопределённости имеют количественный, но не качественный характер [28].

Пока остаётся открытым вопрос, насколько важен был вклад дозвёздного органического синтеза в обогащение органикой формирующихся планет Солнечной системы, в том числе Земли. Имеющиеся наблюдения молекул в протопланетных дисках пока существенно уступают наблюдениям молекул в дозвёздных и протозвёздных объектах [29], однако благодаря совершенствованию наблюдательной техники признаки сложной органики постепенно выявляются и в формирующихся планетных системах [30]. Исследование молекулярного состава протопланетных дисков в бу-

дущем, несомненно, будет одним из магистральных направлений развития астрофизики.

### Литература

1. *Donati G.B.* Schreiben des Herrn Prof. Donati an den Herausgeber // *Astronomische Nachrichten*, v. 62, p. 375, 1864.
2. *Huggins W.* On the spectrum of Coggia's comet / *Proc. Roy. Soc. Lond.*, v. 23, p. 154, 1874.
3. *Eddington A.* Interstellar matter // *Observatory*, v. 60, 899-103, 1937.
4. *Merrill P.W.* Unidentified interstellar lines // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, v. 46, 206, 1934.
5. *McKellar A.* Evidence for the Molecular Origin of Some Hitherto Unidentified Interstellar Lines // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, v. 52, 187, 1940.
6. *Douglas A.E., Herzberg G.* Note on CH<sup>+</sup> in Interstellar Space and in the Laboratory // *Astrophys. J.*, v. 94, 381, 1941.
7. *Struve O., Elvey C.T.* Emission Nebulosities in Cygnus and Cepheus // *Astrophys. J.*, v. 88, 364, 1938.
8. *Ewen H.I., Purcell E.M.* Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec. // *Nature*, v. 168, 356, 1951.
9. *Kramers H.A., ter Haar D.* Condensation in interstellar space // *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, v. 10, 137, 1946.
10. *Bates D.R., Spitzer L. Jr.* The Density of Molecules in Interstellar Space // *Astrophys. J.*, v. 113, 441, 1951.
11. *Шкловский И.С.* Монохроматическое радиоизлучение Галактики и возможность его наблюдения // *Астрон. журн.*, т. 26, 10, 1949.
12. *Weinreb S., Barrett A.H., Meeks M.L., Henry J.C.* Radio Observations of OH in the Interstellar Medium // *Nature*, v. 200, 829, 1963.
13. *Carruthers G.R.* Rocket Observation of Interstellar Molecular Hydrogen // *Astrophys. J.*, v. 161, L81, 1970.
14. *Bok B.J., Lawrence R.S., Menon T.K.* Radio Observations (21-cm) of Dense Dark Nebulae // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, v. 67, 108, 1955.
15. *Wilson R.W., Jefferts K.B., Penzias A.A.* Carbon Monoxide in the Orion Nebula // *Astrophys. J.*, v. 161, L43, 1970.
16. *Tielens A.G.G.M.* *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium.* Cambridge University Press, 2010.
17. *Watson W.D.* The Rate of Formation of Interstellar Molecules by Ion-Molecule Reactions // *Astrophys. J.*, v. 183, L17, 1973.
18. *Herbst E., Klemperer W.* The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // *Astrophys. J.*, v. 185, 505, 1973.
19. *Smith D.* 'Cold fusion': formation of molecules in interstellar plasmas // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, v. 34, 1817, 1992.
20. *Boogert A.C.A., Gerakines P.A., Whittet D.C.B.* Observations of the icy universe // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 53, 541, 2015.
21. *Öberg K.I., Boamah M.D., Fayolle E.C., Garrod R.T., Cyganowski C.J., van der Tak F.* The Spatial Distribution of Organics toward the High-mass YSO NGC 7538 IRS9 // *Astrophys. J.*, v. 771, 95, 2013.
22. *Lykke J.M., Coutens A., Jørgensen J.K., van der Wiel M.H.D. et al.* // *Astron. Astrophys.*, v. 597, A53, 2017.
23. *McGuire B.A., Carroll P. B., Loomis R.A., Finneran I.A., Jewell Ph.R., Remijan A.J., Blake G.A.* Discovery of the interstellar chiral molecule propylene oxide (CH<sub>3</sub>CHCH<sub>2</sub>O) // *Science*, v. 352, 1449, 2016.

24. *Tercero B., Cernicaro J., Pardo J.R., Goicoechea J.R.* A line confusion limited millimeter survey of Orion KL. I. Sulfur carbon chains // *Astron. Astrophys.*, v. 517, A96, 2010.
25. *McElroy D., Walsh C., Markwick A.J., Cordiner M.A., Smith K., Millar T.J.* The UMIST database for astrochemistry 2012 // *Astron. Astrophys.*, v. 550, A36, 2013.
26. *Wakelam V., Herbst E., Loison J.-C., Smith I.W.M. et al.* A Kinetic Database for Astrochemistry (KIDA) // *Astrophys. J. Sup. Ser.*, v. 199, 21, 2012.
27. *Васюнин А.И., Соболев А.М., Вибе Д.З., Семенов Д.А.* О влиянии неточностей скоростей химических реакций на результаты астрохимического моделирования // *Письма в Астрон. журн.*, т. 30, 623, 2004.
28. *Кочина О.В., Вибе Д.З., Каленский С.В., Васюнин А.И.* Моделирование образования сложных молекул в протозвездных объектах // *Астрон. журн.*, т. 90, 892, 2013.
29. *Henning Th., Semenov D.* Chemistry in Protoplanetary Disks // *Chemical Reviews*, v. 113, 9016, 2013.
30. *Öberg K.I., Guzmán V.V., Furuya K., Q. Chunhua, Aikawa Y., Andrews S.M., Loomis R., Wilner D.J.* The comet-like composition of a protoplanetary disk as revealed by complex cyanides // *Nature*, v. 520, 198, 2015.

## **Chapter 10**

### **PRE-BIOLOGICAL EVOLUTION OF ORGANIC MATTER IN THE UNIVERSE**

© **D.S. Wiebe**

*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

Discovery of interstellar molecules has become one of the most prominent findings of 20<sup>th</sup> century. Initially (since late 1930-ies) only simple two-atom compounds have been known. However, the rapid development of radioastronomy during post-war years has allowed expanding this list significantly. Now, the number of known interstellar and circumstellar molecules approaches two hundred (not counting isomers and isotopologues). Among them we see both simple and quite complex molecules. The largest molecules with solid identification consist of 12 atoms ( $\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5$ ,  $\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$ ). Nearly all molecules with more than five atoms represent are organic. More than once even discovery of the simplest amino acid (glycine) in the interstellar medium had been reported. While later all these reports has been refuted, there is no doubt that this is a purely technical problem, and there are no fundamental obstacles on a pathway to interstellar synthesis of simplest amino acids. Definitely, even more complex organic structures are present in the interstellar medium, like fullerenes and some kind of aromatic particles. Recently, this diversity quite often became an incentive to suggest that organic species might have arrived to Earth (and other forming planets) in a “ready-to-use” form. However, one has to remember that numerous factors causing effective molecule destruction are in action in the interstellar medium, in the vicinity of young stars, and in protoplanetary disks.

## **Глава 13**

### **МЕТЕОРИТЫ КАК КАТАЛИЗАТОРЫ ПРЕБИОТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МОЛЕКУЛ ИЗ ФОРМАМИДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

© М.И. Капралов<sup>1</sup>, Р. Саладино<sup>2</sup>, Е. Карота<sup>2</sup>, Дж. Ботта<sup>2</sup>,  
Э. Ди Мауро<sup>2,3</sup>, Г.Н. Тимошенко<sup>1</sup>, Е.А. Красавин<sup>1</sup>, А.Ю. Розанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

<sup>2</sup>*University of Tuscia, Viterbo, Italy*

<sup>3</sup>*University La Sapienza, Rome, Italy*

Специалистами Римского университета Ла Сапиенца, университета «Витербо» (Италия) в сотрудничестве с Лабораторией радиационной биологии Объединенного института ядерных исследований (ИРБ, ОИЯИ, г. Дубна) были проведены эксперименты по облучению формамида ( $\text{HCONH}_2$ ) в сочетании с образцами метеоритов. Результаты свидетельствуют об образовании в реакционной смеси сложных пребиотических макромолекул, включая нуклеозиды – основные фрагменты информационных макромолекул.

#### **Введение**

Жизнь основана на тесном взаимодействии различных метаболических и генетических процессов, которые связаны с химией наиболее распространенных элементов во Вселенной: водорода, кислорода, азота и углерода. Для того чтобы подойти к проблеме происхождения жизни, разумно исходить из предположения, что оба данных процесса (метаболизм и генетика) имели общее происхождение. Т.е. были созданы определенные физическо-химические условия (на Земле, или в космосе), благоприятные для возникновения обоих процессов.

Одним из важных направлений астробиологических исследований является изучение проблемы происхождения пребиотических соединений на Земле. Вопрос о происхождении жизни традиционно рассматривается в разных аспектах. Их можно разделить на две группы, основываясь на принципе «что первично?» — генетика или метаболизм. В исследовании была совершена попытка исключить противоречия между этими двумя подходами, создав единые теоретические и экспериментальные рамки с учетом возможного влияния на феномен возникновения жизни таких факторов, как энергетический, эволюционный, протометаболический и фактор древней окружающей среды. Цель исследования заключается в попытке представить последовательность процессов, которые могут привести к образованию полноценной химически активной пребиотической системы. Были проанализированы реакции синтеза пребиотических соединений из формамида  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$  (продукта гидролиза  $\text{HCN}$ ) в присутствии различных катализаторов — метеоритов различных классов. Формамид – одно из про-

стейших химических соединений, широко распространенных как в межзвездной, так и межпланетной средах. В контексте вопроса о происхождении жизни эти результаты могут указывать на разрешение противопоставления первичности «генетики и метаболизма». Если компоненты как генетических материалов, так и метаболизма синтезируются совместно, то представляется возможным общий эволюционный сценарий. Космологический интерес усиливается тем фактом, что при широком распространении формамида в космосе эти виды синтеза пребиотических молекул происходят при наличии источников энергии в пространстве и катализаторов внеземного происхождения.

### Исследования формамида

#### *Формамид как источник первых биохимических процессов*

Формамид является одним из самых простых органических соединений, существующих как в межзвездном, так и межпланетном пространствах, и состоит из наиболее распространенных элементов во Вселенной (N, H, O, C). На рис. 1 приведен список органических молекул, находящихся как в межзвездном, так и в межпланетном пространствах нашей Вселенной. В настоящее время насчитывается более 100 таких молекул.

CH <sup>+</sup>	HCN	H <sub>2</sub> CO	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> OH	HC <sub>5</sub> N	HCOOCH <sub>3</sub>	HC <sub>7</sub> N
CH	HNC	H <sub>2</sub> CS	C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> CCH	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>
CN	HCO	HNCO	CH <sub>2</sub> NH	CH <sub>3</sub> NC	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH
CO	OCS	HNCS	CH <sub>2</sub> CO	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>3</sub> CHO	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN
CS	HCO <sup>+</sup>	c-C <sub>3</sub> H	NH <sub>2</sub> CN	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>2</sub> CHCN	CH <sub>2</sub> OHCHO	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H
C <sub>2</sub>	HOC <sup>+</sup>	l-C <sub>3</sub> H	HOCHO	HC <sub>2</sub> CHO	C <sub>6</sub> H		CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N
CO <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	C <sub>3</sub> N	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O		CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>
	C <sub>2</sub> H	C <sub>3</sub> O	CH <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> CCCC	CH <sub>2</sub> CHON		HC <sub>9</sub> N
	C <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	H <sub>2</sub> CCC	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>			HC <sub>11</sub> N
	C <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> CN	HCCNC				ОНCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ОН
	CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>	HNCCC				
	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>				
	C <sub>3</sub>	HOCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>				
		HCNH <sup>+</sup>					

**Miller. 2003**

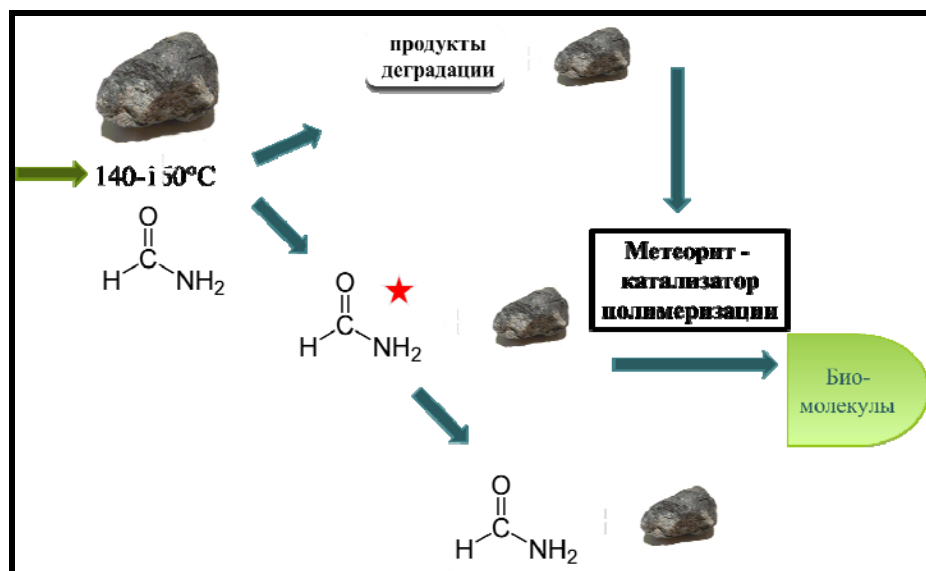
**Рис. 1.** Список органических молекул межзвездного пространства.

Настоящее исследование мотивировано теорией о том, что метеориты могли являться не только переносчиками различных органических молекул, но и служили катализаторами процессов образования новых молекул. Данный синтез мог осуществляться как в космосе, так и на Земле.

#### *Ранние исследования*

В течение последних 3 лет итальянскими специалистами проводились эксперименты, по результатам которых было установлено формирование

простых органических молекул при действии высоких температур на формамид в сочетании с образцами метеоритов различного типа. Исследования реакций синтеза из формамида (чистого формамида) в присутствии катализаторов обычно проводились в течение нескольких десятков часов при повышенных температурах (140–160° С) (рис. 2) [1, 2]. Для стимулирования и поддержания реакций в этих экспериментах использовали подогрев. Известны реакции синтеза соединений из формамида при ультрафиолетовом (УФ) облучении и при комбинированном УФ облучении с нагревом до температур ниже 100°С [3, 4]. Результаты, полученные в таких системах, были, в принципе, такими же, как и при использовании лишь нагревания; существенным исключением был синтез гуанина, чувствительность которого к температуре не позволяет ему существовать при повышенных температурах. Было обнаружено, что при действии высоких температур часть формамида распадается на более простые компоненты (NH<sub>3</sub>, HCN, CO, CO<sub>2</sub> и др.), а другая его часть переходит в возбужденное состояние без изменения исходной структуры. Формамид в возбужденном состоянии имеет высокую склонность к полимеризации и способен взаимодействовать с другими простыми компонентами, указанными выше, формируя новые молекулы. Далее были проведены аналогичные эксперименты, но уже в присутствии различных метеоритов в формамиде. Результаты показали, что при наличии метеорита формамид проявляет более высокую полимеризационную способность, что приводит к образованию более сложных макромолекул.



**Рис. 2.** Блок-схема процесса синтеза биомолекул из формамида (чистого формамида) в присутствии метеорита.

Следует заметить, что действие источников энергии, отличных от тепловых, на реакции синтеза из формамида в присутствии катализаторов не исследовано.

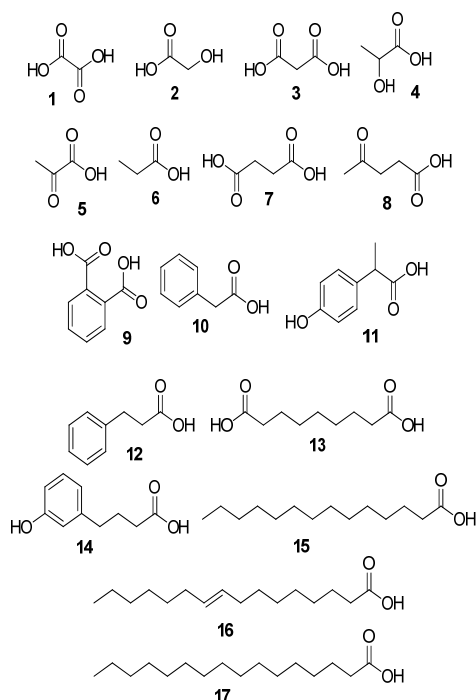
**Настоящее исследование**

В настоящем исследовании были проведены эксперименты, аналогичные ранним, за исключением самого источника энергии, вызывающего полимеризацию формамида. Поставлены эксперименты по облучению образцов различных метеоритов в смеси с формамидом ионизирующей радиацией ( $p$ ,  $C^{12}$ ,  $B^5$ ).

Метеориты были отобраны таким образом, чтобы были представлены все их классы (железные, железокосменные, хондриты, ахондриты) и подклассы. Первые реакции синтеза проведены в условиях облучения формамида пучком протонов с энергией 165 МэВ на фазотроне ОИЯИ в присутствии вышеуказанных катализаторов. Образцы облучались в течение 4 мин с мощностью дозы 1.5 Гр/мин. После облучения метеориты удалялись с помощью центрифугирования, а остаток формамида извлекался методом вакуум-дистилляции. Оставшиеся искомые молекулы анализировались с помощью газовой хроматографии и масс-спектрометрии (GS-MS). Установлено, что после облучения при комнатной температуре в течение 3 минут возникает широкое разнообразие химических соединений. Приведённая ниже таблица 1 показывает, насколько сложен ансамбль продуктов, полученных в присутствии порошкообразного материала железокосменного метеорита NWA-4482 (Класс: палласит. Группа: основная, состоит из больших оливиновых зёрен ( $Fe_{12.2-13.0}$ ) ( $FeO/MnO = 41.1-42.5$ ). Содержит железо в виде гидроксидов, а также хромита, шайберзита ( $Fe, Ni$ )<sub>3</sub>P и металла (камасит и тэнит  $\gamma$ -( $Fe, Ni$ )) [5]. В таблице перечислена лишь часть полученных соединений – около 30% от их общего числа.

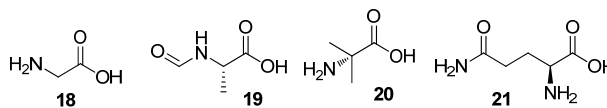
Таблица 1.

n° atoms C		
2	(1) Oxalic acid	1,93
	(2) Glycolic acid	0,51
	(3) Malonic acid	3,23
3	(4) Lactic acid	5,89
	(5) Pyruvic acid	0,33
	(6) Propionic acid	0,18
4	(7) Succinic acid	0,32
5	(8) 4-oxopentanoic acid	0,58
	(9) Phthalic acid	2,45
8	(10) Benzen acetic acid	121,81
	(11) 4-hydroxyphenyl propionic acid	1,13
9	(12) Hydrocinnamic acid	0,4
	(13) Azelaic acid	0,58
10	(14) 3-Hydroxy phenyl butyric acid	1,16
14	(15) Tetradecanoic acid	1,43
16	(16) Palmitelaidic acid	0,64
	(17) Hexadecanoic acid	0,37

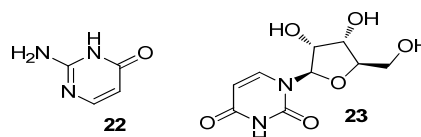


Продолжение табл. 1.

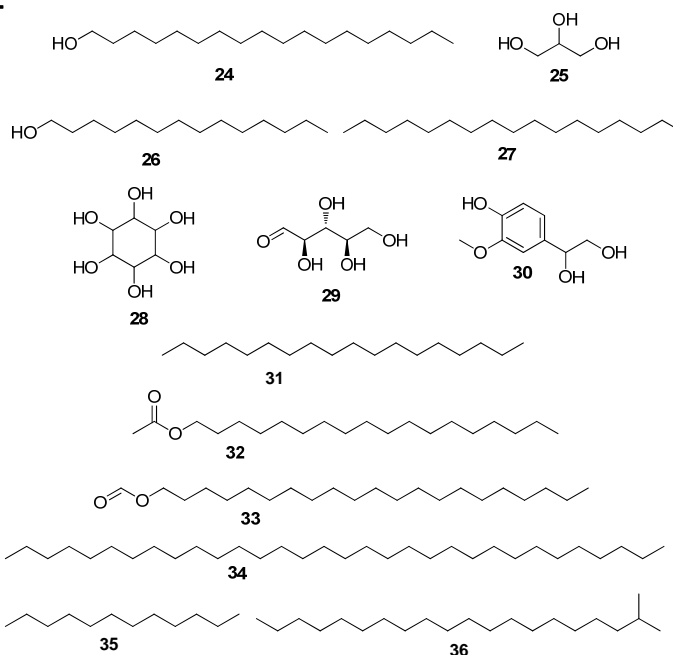
Amino acids ( $\mu\text{g}$ )	
(18) Glycine	0,86
(19) Formyl-alanine	5,56
(20) 2-methyl alanine	10,18
(21) glutamine	0,71



Heterocycles ( $\mu\text{g}$ )	
	75,6
(22) Isocytosine	3
(23) Uridine	0,54



Miscellanea ( $\mu\text{g}$ )	
(24) Octadecanol	10,5
(25) Glycerol	12,09
(26) Tetradecanol	0,47
(27) Heptadecane	1,32
(28) Inositol	32,55
(29) Ribose	2,29
(30) 4-hydroxy 3-methoxy phenethylen glycol	5,35
(31) Octadecane	0,84
(32) Octadecyl ester of acetic acid	1,47
(33) 1-Heneicosyl formate	3,73
(34) Dotriacontane	0,86
(35) Dodecane	0,69
(36) 2-Methyl eicosane	1,16



**Обозначения.** Соединения, синтезированные из формамида (1.5 мл) в присутствии 1% (по весу) порошкообразного NWA 4482 после облучения протонами с энергией 165 МэВ в течение 3 минут. Выход указан в миллиграммах. Соединения упорядочены по сложности. 1–17: кислоты; 18–21: аминокислоты; 22–23: гетероциклические соединения; 24–36: различные соединения.

Также был установлен широкий выход продуктов реакции в результате облучения образцов атомами бора [6] и углерода с энергиями 26 МэВ/нуклон и 500 МэВ соответственно.

В качестве демонстрации влияния метеоритов на процессы образования новых молекул было проведено облучение чистого формамида (рис. 3). Из рисунка 3 видно, что в отсутствие каких-либо метеоритов формамид проявляет более низкую синтезирующую способность. Таким образом, эти результаты экспериментов наглядно показывают разносторонность и производительность синтетической системы формамид – ионизирующие излучения.

Особенно интересно то, что в данной системе в заметных количествах формируются пребиотические соединения — предшественники нуклеиновых кислот, белков, метаболических циклов и метаболизма. Без воздействия ионизирующего излучения никакие пребиотические соединения ранее выявлены не были. Вероятно, в механизме исследуемой реакции участ-

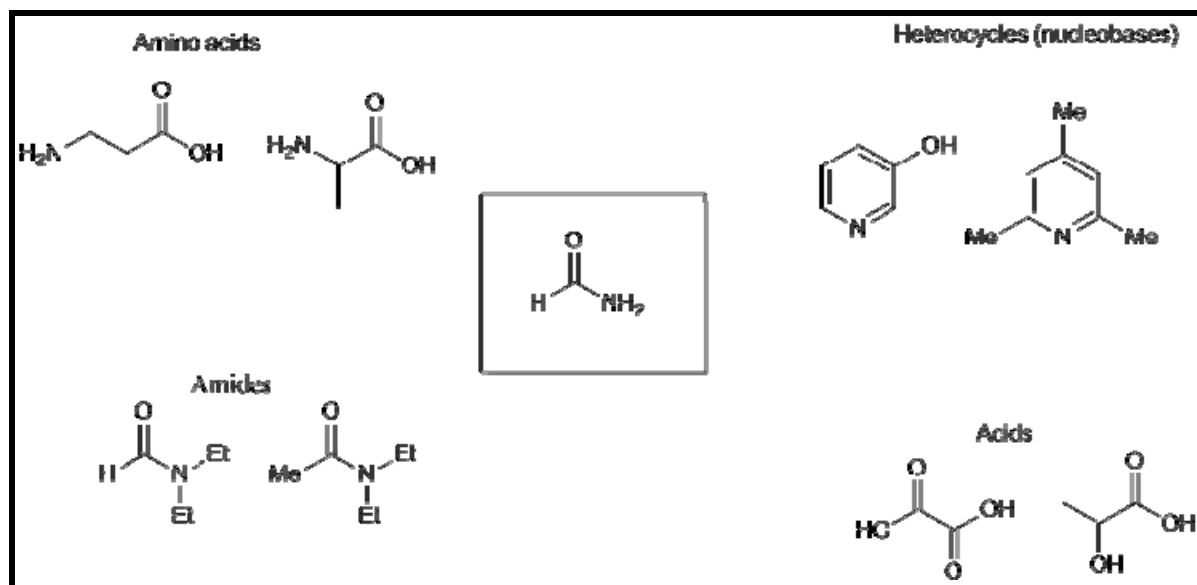


Рис. 3. Продукты синтеза, полученные в результате облучения чистого формамида.

вует радикал формамида как первое из промежуточных реагирующих веществ.

### Заключение

В контексте вопроса о происхождении жизни эти результаты могут указывать на разрешение противопоставления первичности "генетики и метаболизма". Если компоненты, как генетических материалов, так и метаболизма синтезируются совместно, то представляется возможным общий эволюционный сценарий. Космологический интерес усиливается тем фактом, что при широком распространении формамида в космосе эти виды синтеза пребиотических молекул происходят при наличии источников энергии в пространстве и катализаторов внеземного происхождения [7].

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что метеориты являются не только переносчиками различных молекул, но и катализаторами образования новых более сложных органических молекул на своей поверхности. Данное исследование явилось прорывным в своей области и не имеет аналогов в мире.

### Литература

1. R. Saladino, C. Crestini, S. Pino, G. Costanzo, E. Di Mauro. Formamide and the origin of life *Physics Of Life Reviews* (2012) 9, 84–104.

2. R. Saladino, G. Botta, S. Pino, G. Costanzo, E. Di Mauro. Genetics first or metabolism first? The formamide clue. *Chemical Society Review* (2012) 41, 5526–5565.
3. S.D. Senanayake and H. Idriss. Photocatalysis and the origin of life: Synthesis of nucleoside bases from formamide on TiO<sub>2</sub> (001) single surfaces. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2006, 103, 1194–1198.
4. H. Barks, R. Buckley, G.A. Grieves, E. Di Mauro, N. Hud and T. Orlando. Guanine, Adenine, and Hypoxanthine Production in UV-Irradiated Formamide Solutions: Relaxation of the Requirements for Prebiotic Purine Nucleobase Formation. *ChemBioChem* (2010) 11:1240–1243.
5. A.J. Irving, S.M. Kuehner. UWS University of Washington, Dept of Earth and Space Sciences, Seattle, WA. *Meteoritical Bulletin n. 92, MAPS 42*, (2007), 1647–1684.
6. R. Saladino, E. Carota, G. Botta, M.I. Kapralov, G.N. Timoshenko, A.Yu. Rozanov, E.A. Krasavin, E. Di Mauro. First Evidence on the Role of Heavy Ion Irradiation of Meteorites and Formamide in the Origin of Biomolecules. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, pp. 1–7, 2016.
7. G.R. Adande, N.J. Woolf, L.M. Ziurys. Observations of Interstellar Formamide: Availability of a Prebiotic Precursor in the Galactic Habitable Zone. *Astrobiology*, (2013) 13(5): 439–453.

### *Chapter 13*

## **METEORITES CATALYSED PREBIOTIC SYNTHESIS OF BIOMOLECULES FROM FORMAMIDE UNDER RADIATION CONDITIONS**

© M.I. Kapralov<sup>1</sup>, R. Saladino<sup>2</sup>, E. Carota<sup>2</sup>, G. Botta<sup>2</sup>,  
Di Mauro E.<sup>2,3</sup>, Timoshenko G.N.<sup>1</sup>, Krasavin E.A.<sup>1</sup>, Rozanov A.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

<sup>2</sup>*University of Tuscia, Viterbo, Italy*

<sup>3</sup>*University La Sapienza, Rome, Italy*

Formamide is one of the most simple organic compounds – the first member of a homologous series of carboxylic acid amides and consists of those the most "common elements of the Universe" (NH<sub>2</sub>COH). Also, this chemical compound is contained in most of meteorites, in particular on carbonaceous chondrites. In this paper the theory that formamide was the source of the first biochemical processes on Earth. According to this theory, the first biochemical molecules were synthesized as a result of the impact of different qualities of ionizing radiation on meteorites containing formamide on its surface. This synthesis could be carried out both in space and on the Earth.

Specialists of the Sapienza University of Rome and Viterbo University, Italy, and the Laboratory of Radiation Biology jointly performed experiments on 170 MeV proton irradiation of samples of formamide a widespread compound in combination with samples of different meteorites. Results indicate that different complicated prebiotic macromolecules up to nucleosides main fragments of in-

formation macromolecules are formed in the reaction mixture exposed to radiation.

## **Глава 14**

# **О ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТАВКИ НА РАНнюю ЗЕМЛЮ (ПРЕД)БИОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ПАДЕНИЯХ ПРИМИТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ**

© **В.В. Бусарев**

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия*

Окаменевшие бактерии или псевдоморфозы микроорганизмов (прокариотов, цианобактерий и даже многоклеточных организмов), вероятно, обнаружены в углистых хондритах из земных коллекций метеоритов уже давно [44–47]. Однако их идентификация в биосфере Земли очень сложна и неоднозначна. Из наших результатов и предположений о происхождении примитивных астероидов («С», «D» и подобных типов), имеющих низкотемпературную минералогию, следует, что реликты примитивной жизни могут быть не только в углистых хондритах, но также и в поверхностном материале и/или в недрах примитивных астероидов, где, вероятно, имелись благоприятные условия для возникновения такой первичной жизни в течение нескольких первых миллионов лет, и которые могут происходить из зон формирования прото-Юпитера и других планет-гигантов [29, 30]. Высокая пористость и низкая механическая прочность таких астероидов, вероятно, были критическими параметрами, которые способствовали проникновению их небольших фрагментов на раннюю Землю при выбросе этих тел прото-гигантами в центральном направлении.

## **Введение**

Создание таксономической (систематической) классификации астероидов (напр., [1–3]), основанной на их спектральных характеристиках (спектрах отражения в диапазоне  $\sim 0,4\text{--}0,1$  мкм), определяющих в первом приближении минералогию этих древнейших небесных тел (напр., [4]), позволило построить гелиоцентрические распределения их таксономических типов [1, 3] и, таким образом, реконструировать строение ранней Солнечной системы (РСС) в области Главного пояса астероидов (ГПА) ( $\sim 2,0\text{--}3,3$  а. е.), сложившееся во временном масштабе нескольких первых десятков миллионов лет [5–7]. Эти распределения показывают, что астероиды высокотемпературных типов ("E", "M", "S" и др.) тяготеют к меньшим гелиоцентрическим расстояниям, а примитивных или низкотемпературных типов ("C" и близких к нему "F", "G" и др.) – к большим [1, 3] (рис. 1а, б).

Кроме того, важными особенностями являются "всеохватывающий" характер гелиоцентрического распределения астероидов С-типа (или С-комплекса), расположение максимума этого распределения у внешнего края ГПА, а его дальнего предела – в окрестности орбиты Юпитера (5,2 а. е.) (рис. 1а). Необходимо также подчеркнуть, что астероиды С-типа являются наиболее многочисленными и составляют  $\sim 75\%$  известных астероидов ГПА (общее количество которых уже достигает  $\sim 500$  тысяч) и имеют примитивную или низкотемпературную минералогию (включая

гидросиликаты, окислы и гидроокислы) (напр., [8]). Последнее подтверждается близким сходством спектров отражения астероидов С-типа с лабораторными спектрами отражения раздробленных образцов углистых хондритов [8–10].

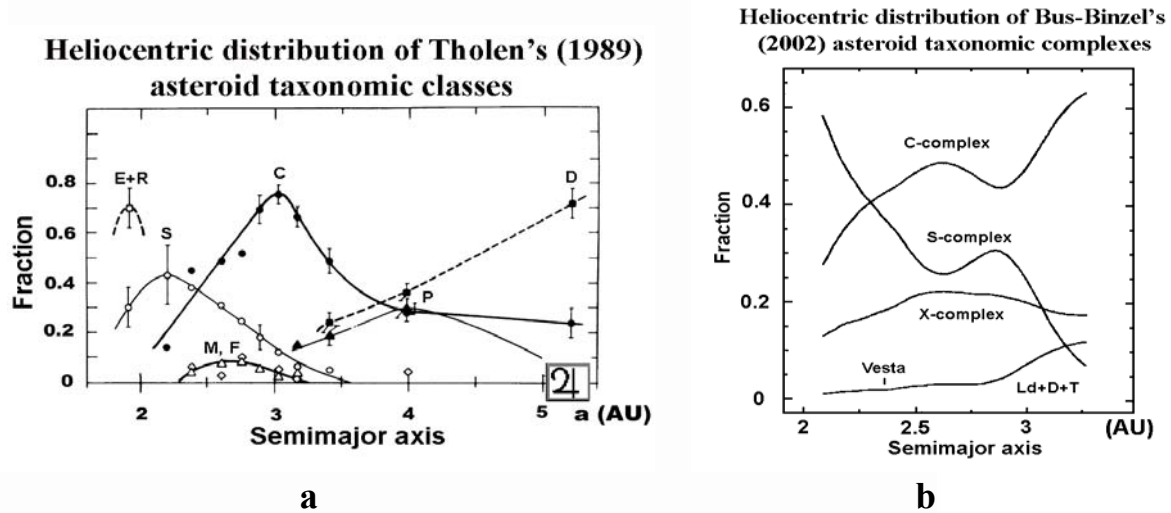


Рис. 1.

Покажем, что практически сразу после формирования в РСС астероидов низкотемпературных типов и подобных им каменно-ледяных тел за границей конденсации водяного льда в их недрах могли быть благоприятные условия для самопроизвольного зарождения примитивной жизни.

### Внутренняя тепловая эволюция РТА и подобных им тел

Очевидно, процесс аккреции допланетных тел, включая родительские тела астероидов (РТА) (в ходе столкновения и объединения более мелких тел типа планетезималей), способствовал накоплению их внутренней тепловой энергии. Но, как показывает изучение метеоритов (напр., [5, 6]), являющихся фрагментами астероидов, в пределах первых нескольких миллионов лет произошел и более значительный внутренний разогрев РТА при распаде короткоживущих радиоизотопов (в основном  $^{26}\text{Al}$ , с периодом полураспада 0,72 млн. лет,  $^{60}\text{Fe}$  с периодом полураспада 2,62 млн. лет [17], но первоначальное содержание последнего было, по крайней мере, на порядок меньше, чем  $^{26}\text{Al}$  [18] и др.), инжектированных в протопланетное облако соседней AGB-звездой, имеющей высокий темп потери массы, либо при взрыве новой или сверхновой звезды (напр., [11]). Как показало моделирование (напр., [7, 12]), в случае быстрой аккреции РТА (в течение  $\sim 1$  млн. лет) и малого содержания в их веществе летучих соединений происходил резкий рост внутренней температуры (до  $\sim 1500^\circ\text{C}$ ), и имелись условия для магматической дифференциации и формирования высокотемпературной минералогии в недрах достаточно крупных тел. При наличии же в составе вещества значительной доли ледяного материала РТА нагре-

вались до температур более низких ( $<200\text{--}300^\circ\text{C}$ ), но достаточных для полного плавления льда, водной дифференциации этих тел и формирования низкотемпературной минералогии (напр., [13]).

Аналитическое моделирование ранней тепловой эволюции каменно-ледяных тел на периферии РСС (в качестве предельного случая были рассмотрены транснептуновые объекты) с наиболее вероятным для кометного вещества составом (примерно равным долевым соотношением льдов, включающих  $\sim 80\%$  водяного льда, тугоплавкой органики или CHON и силикатного вещества [14, 15]) показало, что распад короткоживущих изотопов ( $^{26}\text{Al}$  и др.) в силикатной компоненте вещества достаточно крупных тел ( $>200$  км) (по причине их лучших теплоизолирующих свойств) мог стать основным тепловым источником для образования внутреннего водного океана со средней температурой  $\sim 4^\circ\text{C}$  и поддержания его в жидком состоянии в пределах от нескольких миллионов лет до  $\sim 10$  млн. лет [15]. На этом основании было сделано предположение о существовании в недрах рассматриваемых тел условий для спонтанного возникновения первичной примитивной жизни [16].

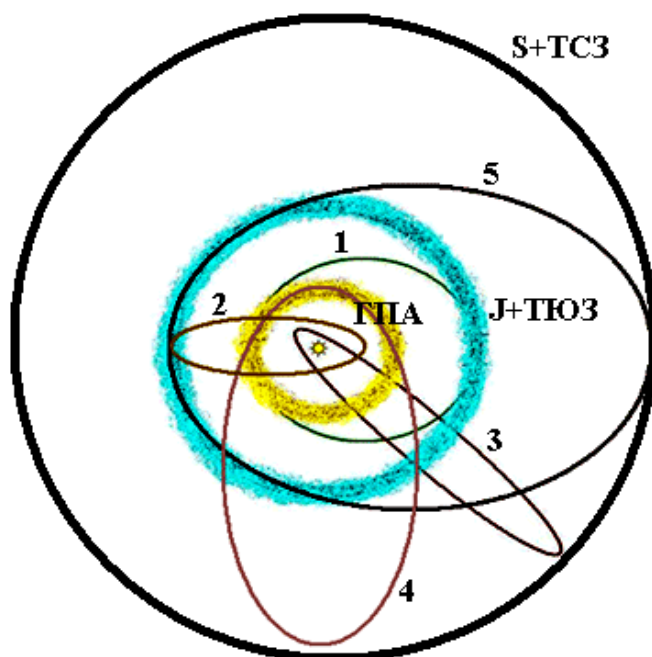
#### **Возможное происхождение, динамическая и ударная эволюция примитивных астероидов**

Подобные ранние процессы образования внутреннего водного океана, водной дифференциации и образования силикатно-органических ядер должны были протекать на всех крупных каменно-ледяных телах Солнечной системы за границей конденсации водяного льда [15], которая, как показывает моделирование эволюции нашего протопланетного облака и наблюдения формирующихся сейчас планетных систем [19–22], находилась (или могла перемещаться по причине изменений яркости раннего Солнца) примерно между внешним краем ГПА и современной орбитой Юпитера. Можно предполагать, что с учетом более высокого содержания силикатов и, значит  $^{26}\text{Al}$ , в силикатно-органических ядрах крупных каменно-ледяных тел в зоне формирования Юпитера или тел юпитерианской зоны (ТЮЗ) были более высокие температуры и, поэтому были более благоприятные условия для образования и аккумуляции не только гидросиликатов и простейшего органического вещества (типа керогена или битума), но и возникновения предбиологических соединений, например, аминокислот, или даже простейших биологических структур [16].

Необходимо перечислить также ряд сопутствующих факторов, которые могли оказать значительное влияние на внутреннюю и динамическую эволюцию каменно-ледяных тел в зонах формирования Юпитера и других планет-гигантов. Не вызывает сомнений, что одним из таких факторов была экзотермическая реакция серпентинизации, или превращения безводных силикатов (пироксенов, оливинов и др.) в гидросиликаты, которая происходила в недрах тел, включающих водную среду. Такая реакция, начав-

шись при низких температурах (вблизи 273К) и наличии водяного льда, происходит с выделением достаточного количества тепла для полного плавления льда, находящегося в контакте с силикатным веществом [23, 24]. Наряду с выделением тепла образуется значительное количество газов ( $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ ), накопление которых в недрах рассматриваемых тел могло привести к их взрывному разрушению [25, 26] или к высокой пористости и, соответственно, – к низкой механической прочности этих тел.

Изучение процесса роста прото-Юпитера показало, что еще одним существенным фактором динамической и ударной эволюции ТЮЗ и РТА стал гравитационный выброс ТЮЗ зародышем Юпитера (при достижении им  $\sim 2\text{--}3$  масс Земли) во всех направлениях, в том числе в ГПА [19, 27].



**Рис. 2.**

Выбрасываемые прото-Юпитером ТЮЗ (рис. 2, "J+ТЮЗ") с высокими скоростями (до  $\sim 30$  км/с), двигавшиеся по высокоэллиптическим орбитам (рис. 2, орбиты "2" и "3"), при столкновениях с РТА должны были полностью "выметать" последние из ГПА (рис. 2, "ГПА"). Как правило, объем материала, оставшегося в эпицентре столкновения двух тел, обратно пропорционален их относительной скорости до столкновения. В то же время ТЮЗ, которые двигались по менее эксцентричным орбитам (рис. 2, "1"), привели к доставке в ГПА "собственного" материала. Они проникали в ГПА не только с наименьшими скоростями (2–3 км/с) [19], благоприятными для сохранения большей части летучих соединений (водяного льда, гидросиликатов и органики), но и могли находиться там более длительное время и поэтому имели более высокую вероятность взаимодействий (ударных и гравитационных) с РТА. Здесь важную роль должны были сыграть

отмечавшиеся выше высокая пористость и низкая механическая прочность ТЮЗ, которые, вероятно, привели к преобладающему дроблению этих тел при низкоскоростных столкновениях с РТА, имевшими, видимо, в основном силикатный состав [5, 28]. Таким образом, из ГПА могла быть удалена многократно превышающая современную масса исходного вещества (напр., [19, 27]), но и привнесена значительная масса каменно-ледяного материала в виде раздробленных фрагментов ТЮЗ, которые, по-видимому, и стали астероидами примитивных типов. В этом состоит суть нашей гипотезы о том, что астероиды "С" и близких к нему типов, а также углистые хондриты являются осколками испытавших раннюю тепловую эволюцию водно-дифференцированных допланетных тел из зоны роста Юпитера [29, 30]. Полученные нами наблюдательные подтверждения данной гипотезы (наряду с упоминавшимися особенностями гелиоцентрического распределением астероидов примитивных типов) – это: (1) наличие нетипичных гидросиликатов на абсолютном большинстве астероидов с высокотемпературной минералогией [31] (как следствие падения на них направленного в сторону Солнца непрерывного потока небольших метеороидных тел примитивного состава) и (2) спектральные признаки содержания значительной ледяной компоненты в веществе астероидов с низкотемпературной минералогией [32].

Аналогичным образом ядро Сатурна (после достижения им ~2–3 масс Земли) должно было выбрасывать каменно-ледяные допланетные тела из собственной зоны роста или, как мы их называем, тела сатурнианской зоны (ТСЗ) (рис. 2, "S+ТСЗ", орбиты "4" и "5"). Но относительные размеры орбит показывают, что вероятность попадания ТСЗ в ГПА (рис. 2, орбита "4") могла быть примерно в 2 раза ниже, чем в зону формирования Юпитера (при условии равной вероятности выброса ТСЗ во всех направлениях) (рис. 2, орбита "5"). Можно предполагать, что обсуждаемый сценарий пригоден и для объяснения происхождения имеющихся в ГПА астероидов D-типа и Троянцев Юпитера (относящихся в основном к D-типу). У таких астероидов имеются спектральные признаки более высокого содержания органики по сравнению с астероидами С-типа: больший средний положительный градиент спектра отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и отсутствие в нем каких-либо полос поглощения (напр., [8, 33]), что, в свою очередь, указывает на большую удаленность от Солнца места происхождения этих тел.

### **Условия возникновения примитивной жизни в РСС**

Результаты исследований условий возникновения жизни, выполненные российско-итальянской группой по радиационной биологии в ОИЯИ (г. Дубна) [34, 35] показывают, что широко распространенные в межзвездной среде трехатомные молекулы – цианистоводородная кислота HCN и вода H<sub>2</sub>O, а также производный от них формамид (NH<sub>2</sub>COH) – лежат в ос-

нове зарождения жизни. При облучении формамида потоками протонов (при 273К) в пребиотической среде и в присутствии катализаторов (раздробленных до порошка железо-каменных метеоритов и хондритов) был обнаружен одновременный синтез соединений, представляющих потенциал для развития прегенетики (на основе РНК и ДНК) и преметаболизма, на которых базируется земная форма жизни [34, 35]. Значительная распространенность формамида в Космосе, в том числе на безатмосферных планетных телах, была установлена по его диагностическим полосам поглощения в инфракрасном (у 4 и 6 мкм) и в миллиметровом (у 1, 2 и 3 мм, 65–280 GHz) диапазонах (напр., [36, 37]), что делает его, наряду с HCN (или HNC) и H<sub>2</sub>O, универсальным исходным соединением для предполагаемого спонтанного (при соответствующих условиях) возникновения примитивной жизни.

Однако очевидно, что обозначенный путь возникновения внеземной жизни в открытой межзвездной или межпланетной среде не мог достичь своего логического конца. Последующие этапы предполагаемого более сложного биологического синтеза нуждались в защите от жестких космических факторов и наличия температурных и других условий для появления жидкой воды, катализаторов (глинистых и других соединений) и т. п. (напр. [38]). Такие условия могли существовать в рассматриваемый период времени только на планетных телах, точнее, в их недрах. На основе наблюдений [31, 32] и расчетов [15] было показано, что в течение первых нескольких миллионов лет такими объектами в РСС, в которых могли возникнуть описанные условия для гипотетической внеземной жизни, были каменно-ледяные тела на всей периферии РСС (от орбиты Юпитера до транснептуновых объектов).

### **Как внеземные (пред)биологические материалы могли оказаться на поверхности ранней Земли?**

Итак, нами описана взаимосвязанная цепь физических, физико-химических и других процессов (реальность которых в прошлом практически доказана), приведших к возникновению в недрах каменно-ледяных тел, фрагменты которых впоследствии, по-видимому, стали астероидами примитивных типов, условий, благоприятных для появления примитивной жизни. Важно отметить, что внутренняя тепловая эволюция и водная дифференциация таких тел в зоне формирования Юпитера, вероятно, происходила не только при повышенных температурах, но и при значительно более высоких относительных содержаниях воды и органики (до ~ 30%), чем на РТА, образовавшихся *in situ*.

Выброс крупных (до ~1000 км) каменно-ледяных тел Юпитером из его зоны роста мог длиться сотни миллионов лет и более, то есть до того времени, когда закончилось формирование планет земной группы (напр., [19, 39]), а выброс более мелких тел, возможно, происходит до настоящего

времени. Одним из убедительных подтверждений этого (вместе с упомянутым наличием нетипичных гидросиликатов на большинстве астероидов высокотемпературных типов [31]) является обнаружение с помощью КА *Dawn* (NASA) [40–42] пятен нетипичных гидросиликатов и углисто-хондритового вещества на 4 Весте – крупнейшем астероиде с высокотемпературным (базальтовым) составом.

Вполне вероятно, что интенсивный поток примитивных астероидов на формирующиеся планеты земной группы, включая прото-Землю, стал основным источником воды и (пред)биологических соединений, что согласуется с фактом близости изотопного отношения D/H водяных включений в CI-хондритах, и воды в кометах семейства Юпитера и в земных океанах (напр., [28]).

В углистых хондритах, упавших на земную поверхность, содержание H<sub>2</sub>O достигает ~10 мас.% (напр., [43]) в связанном состоянии, что до последнего времени считалось предельной величиной и для астероидов C-типа, как их вероятных родительских тел. Но обнаружение одновременной сублимационной активности на нескольких примитивных астероидах ГПА вблизи перигелия (на 145 Адеоне, 704 Интерамнии, 779 Нине и 1474 Бейре [32]), показывает, что для их вещества характерно значительное содержание водяного льда и в свободном состоянии.

После ранней тепловой эволюции примитивные астероиды C-типа и подобные им, как возможные реликты каменно-ледяных тел из зоны формирования Юпитера, должны иметь неоднородную (слоистую) внутреннюю структуру, высокую пористость и, следовательно, низкую механическую прочность. При падениях таких тел на Землю происходит их дезинтеграция и рассеяние на больших высотах в атмосфере. Таким образом, значительная часть их вещества в виде небольших фрагментов и пыли могла достигать земной поверхности в неповрежденном состоянии.

Фоссилизированные бактерии или псевдоморфозы по микроорганизмам (прокариотам, цианобактериям и даже многоклеточным организмам) уже давно, вероятно, обнаружены в углистых хондритах из земных метеоритных коллекций [44–47]. Но их идентификация в земной биосфере сильно затруднена. Главным аргументом перечисленных авторов является идентичность вещества в этих бактериальных псевдоформах с включающим их метеоритным материалом. Из наших результатов следует, что реликты первичной примитивной жизни могут быть не только в углистых хондритах, но и в поверхностном веществе и/или в недрах примитивных астероидов.

#### Литература

1. *Tholen D.J.*, 1989. Asteroid taxonomic classifications. In: *Asteroids II.* (Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M.S., eds.), Univ. of Arizona Press, pp. 1139–1150.
2. *Bus S.J., Binzel R.P.*, 2002a. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. *The Observations.* *Icarus* 158, 106–145.

3. *Bus S.J., Binzel R.P., 2002b.* Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus* 158, 146–177.
4. *Amelin Y., Krot A., 2007.* Pb isotopic age of the Allende chondrules. *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 1321–1335.
5. *Grimm R.E., McSween Jr. H.Y., 1993.* Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating. *Science* 259, 653–655.
6. *Srinivasan G., Goswami J.N., Bhandari N., 1999.*  $^{26}\text{Al}$  in eucrite Piplia Kalan: Plausible heat source and formation chronology. *Science* 284, 1348–1350.
7. *Ghosh A., Weidenschilling S.J., McSween Jr. H.Y., Rubin A., 2006.* Asteroidal heating and thermal stratification of the asteroid belt. In: *Meteorites and the early solar system II* (D.S. Lauretta and H.Y. Jr. McSween, eds.), Univ. of Arizona Press, pp. 555–566.
8. *Gaffey, M.J., Bell, J.F., Cruikshank D.P., 1989.* Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy. In: *Asteroids II* (Binzel, R.P., Gehrels, T., Matthews, M.S., eds.), Univ. of Arizona Press, pp. 98–127.
9. *Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M.O.D., Mann P., 2011a.* Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites. *Icarus* 212, 180–209.
10. *Cloutis E.A., Hudon P., Hiroi T., Gaffey M.J., Mann P., 2011b.* Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites. *Icarus* 216, 309–346.
11. *Sahijpal S., Soni P., 2006.* Stellar nucleosynthetic contribution of extinct short-lived nuclei in the early solar system and the associated isotopic effects. *Met. Planet. Sci.* 41, 953–976.
12. *McSween H.Y. Jr., Ghosh A., Grimm R.E. et al., 2002.* Thermal evolution models of asteroids. In: *Asteroids III* (Eds. Bottke W. et al.), Tucson: Univ. of Arizona Press, pp. 559–571.
13. *Zolensky M.E., Bourcier W.L., Gooding J.L., 1989.* Aqueous alteration on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 computer simulations. *Icarus* 78, 411–425.
14. *Lodders K., Fegley B., 1998.* The planetary scientist's companion. Oxford Univ. Press. New York, Oxford.
15. *Busarev V.V., Dorofeeva V.A., Makalkin A.B., 2003.* Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation. *Earth, Moon and Planets* 92, 345–357.
16. *Бусарев В.В., 2014.* Каменно-ледяные тела как возможные инкубаторы первичной жизни. В сб.: *Космические факторы эволюции биосферы и геосферы*, "Издательство ВВМ" (ISBN 978-5-9651-0861-9), Санкт-Петербург, с. 32–38.
17. *Chechev V.P., Huang X., 2015.* Decay data of radionuclides along the valley of nuclear stability for astrophysical applications. *Applied Radiation and Isotopes* 105, 114–118.
18. *Quitté G., Markowski A., Latkoczy C., Gabriel A., Pack A., 2010.* Iron-60 heterogeneity and incomplete isotope mixing in the early solar system. *Astrophys. J.* 720, 1215–1224.
19. *Сафронов В.С., 1969.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет, М: Наука, 244 с.
20. *Lewis J.S., 1974.* The temperature gradient in the solar nebula. *Science* 186, 440–442.
21. *Макалкин А.Б., Дорофеева В.А., 2009.* Распределение температуры в околосолнечном протопланетном диске на последовательных стадиях его эволюции. *Астрон. вестн.* 43, 528–554.
22. *Bitsch, B., Johansen, A., Lambrechts, M., Morbidelli, A., 2015.* The structure of protoplanetary discs around evolving young stars. *Astron. Astrophys.* 575, 28–44.
23. *Oze C., Sharma M., 2007.* Serpentinization and the inorganic synthesis of  $\text{H}_2$  in planetary surfaces. *Icarus* 186, 557–561.
24. *Kammer J.A., Sparks D.W., Tice M.M., 2010.* Molecular hydrogen evolution in small icy planetesimals. 41<sup>st</sup> Lunar Planet. Sci. Conf., Abs. # 2690, Houston, USA.

25. *Wilson L., Keil K., Browning L.B., Krot A.N., Bourcier W.*, 1999. Early aqueous alteration, explosive disruption, and reprocessing of asteroids. *Met. Planet. Sci.* 34, 541–557.
26. *Rosenberg N.D., Browning L., Bourcier W.L.*, 2001. Modeling aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites. *Met. Planet. Sci.* 36, 239–244.
27. *Сафронов В.С., Зиглина И.Н.*, 1991. Происхождение пояса астероидов. *Астрон. вестн.* 25, 190–199.
28. *Alexander C.M. O'D., Bowden R., Fogel M.L., Howard K.T., Herd C.D.K., Nittler L.R.*, 2012. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. *Science* 337, 721–723.
29. *Бусарев В.В.*, 2011. Гипотеза о происхождении углистых хондритов на малых телах и ее подтверждения. *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та*, №6(39), 70–76.
30. *Busarev, V.V.*, 2012. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites. *Conf. "Asteroids, Comets, Meteors 2012"*, Niigata, Japan, Abs. #6017.
31. *Бусарев В.В.*, 2016. Новые спектры отражения 40 астероидов: сравнение с предшествующими результатами и интерпретация. *Астрон. вестн.* 50, 15–26.
32. *Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б.*, 2016. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры. *Астрон. вестн.* 50, 300–312.
33. *Emery J.P., Burr D.M., Cruikshank D.P.*, 2011. Near-Infrared Spectroscopy of Trojan Asteroids: Evidence for Two Compositional Groups. *Astron. J.* 141, 25–42.
34. *Saladino R., Botta G., Pino S., Costanzo G., Di Mauro E.* Genetics First or Metabolism First? The Formamide Clue. *Chemical Society Review*. 2012. V. 41. P. 5526–5565.
35. *Saladino R., Carota E., Botta G., Kapralov M., Timoshenko G.N., Rozanov A.Y., Krasavin E., Di Mauro E.*, 2015. Meteorite-catalyzed syntheses of nucleosides and of other prebiotic compounds from formamide under proton irradiation. *PNAS* (Published online: 13 April 2015 (<http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1422225112>)).
36. *Rubin R.H., Benson R.C., Tigelaar H.L., Flygare W.H.* Microwave detection of interstellar formamide. *Mémoires Soc. Royale des Sci. de Liège*. 1972. T. III. P. 471–474.
37. *Halfen D.T., Ilyushin V., Ziurys L.M.*, 2011. Formation of peptide bonds in space: A comprehensive study of formamide and acetamide in Sgr B2(N). *Astrophys. J.* 743, 60–71.
38. *Мухин Л.М.*, 2009. Условия на поверхности Земли 4–4,6 млрд. лет назад. Первичные синтезы. В сб.: *Проблемы происхождения жизни* (под ред. *А.И. Григорьева* и др.), М.: ПИН РАН, с. 120–130.
39. *Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J.*, 2001. The primordial excitation and clearing of the asteroid belt. *Icarus* 153, 338–347.
40. *Бусарев В.В.*, 2010. Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий. *Астрон. вестн.* 44, 539–551.
41. *McCord T.B., Li J.-Y., Combe J.-P. and 26 co-authors*, 2012. Dark material on Vesta from the infall of carbonaceous volatile-rich material. *Nature* 491, 83–86.
42. *Reddy V., Le Corre L., O'Brien D.P. and 22 co-authors*, 2012. Delivery of dark material to Vesta via carbonaceous chondritic impacts. *Icarus* 221, 544–559.
43. *Dodd R.T.*, 1981. *Meteorites - A petrologic-chemical synthesis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 368 p.
44. *Nagy B.*, 1975. *Carbonaceous Meteorites*. N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Co., 747 p.
45. *Hoover R.B., Rozanov A.Yu., Zhmur S.I., Gorlenko V.M.*, 1998. Further evidence of microfossils in carbonaceous chondrites. *Proc. SPIE*. V. 3441. P. 203–216.
46. *Розанов А.Ю.*, 2009. Псевдоморфозы по микробам в метеоритах. В сб. *"Проблемы происхождения жизни"*. М.: ПИН РАН, с. 158–165.

47. Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гептнер А.Р. и др., 2011. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах (Науч. ред. Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т.), М.: ПИН РАН, 172 с.

### *Chapter 13*

## **THE POSSIBILITY OF DELIVERY TO EARLY EARTH (PRE)BIOTIC STRUCTURES AT FALLS OF PRIMITIVE ASTEROIDS**

© **V.V. Busarev**

*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia*

Silicified bacteria or pseudomorphs of microorganisms (prokaryotes, cyanobacteria and even multicellular organisms) are possibly found in carbonaceous chondrites from terrestrial meteorite collections long ago [44–47]. However, their identification in the Earth's biosphere is very difficult and ambiguous. From our results and suggestions about origin of primitive asteroids ("C", "D" and similar types) having low-temperature mineralogy, it follows that relics of the first primitive life may be not only in the carbonaceous chondrites but also in the surface material and/or in the interiors of primitive asteroids, where favorable conditions for the emergence of such a primary life existed probably for the first few million years, and the provenances of which might have been in the formation zones of proto-Jupiter and other giant planets [29, 30]. High porosity and low mechanical strength of such asteroids were likely critical parameters that contributed to penetration of their small fragments to the early Earth at ejections of the bodies by the proto-giants in the central direction.

## *Глава 15*

# **РАННЯЯ АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ В СВЕТЕ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ**

© **В.И. Шематович**

*Институт астрономии РАН,  
Москва, Россия*

Представлен обзор актуальных подходов к исследованию образования и эволюции ранней земной атмосферы на основе данных сравнительной планетологии. Интенсивные исследования атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах привели к развитию наших представлений о процессах образования и эволюции протоатмосфер небесных тел на самых ранних стадиях формирования планетной системы [Massol et al., 2016]. Прото- или первичные атмосферы планет сейчас связываются со следующим сценарием образования. Если протопланетное ядро аккрецирует вещество и растет внутри газового диска, то оно может захватывать основные –  $H_2$ , He, – и примесные газы из диска. Когда газ испаряется из диска, то ядро, окруженное газовой оболочкой из  $H_2$  и He, подвергается воздействию интенсивных потоков излучения в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах звездного излучения и потока плазмы звездного ветра от молодой родительской звезды. Этот период может рассматриваться как начало диссипации первичной атмосферы. Основную роль играют процессы тепловой диссипации в режимах испарения и/или гидродинамического оттока атмосферного газа. Обсуждаются вопросы использования современных моделей тепловой и нетепловой диссипации для исследования потери первичной атмосферы Земли и образования и эволюции вторичной атмосферы.

### **1. Введение**

На протяжении последних десятилетий известно, что диссипация планетной атмосферы (или атмосферное убегание) играет важную роль в эволюции планет земной группы в Солнечной системе, хотя, многие детали атмосферного убегания по-прежнему активно обсуждаются [Shizgal, Arkos, 1996; Johnson и др., 2008]. Убегание (или диссипация) летучих из атмосферы – это классическая проблема образования и эволюции планетных атмосфер. Проблема стала весьма актуальной сейчас благодаря появившейся возможности изучать кумулятивные эффекты убегания для внесолнечных планет [Massol и др., 2016].

Происхождение атмосферы Земли является фундаментальным вопросом сравнительной планетологии. Основными альтернативами являются первичная атмосфера, захваченная из солнечного газового диска или паровая атмосфера, образовавшаяся за счет дегазации газов  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ , ... из мантии при аккреции вещества на Землю. Хотя в настоящее время этот вопрос решен в пользу вторичной атмосферы, однако первичная атмосфера, наверное, существовала и сыграла некоторую роль в эволюции Земли.

Первичная атмосфера по определению состоит из газов, захваченных из солнечной туманности (см., например, недавний обзор [Massol и др.,

2016]). В этой модели планетезимали (первое поколение твердых тел, только что сформировавшихся в туманности) и протопланеты (в стадии роста между планетезималиями и планетами) захватывают межзвездный газ посредством гравитационного притяжения. Этот процесс становится гораздо более эффективным, если протопланеты массивные, а туманность холодная. Захваченный газ в основном состоял из молекулярного водорода  $H_2$ , на сегодняшний день самого распространенного элемента во Вселенной, и из некоторых летучих веществ, представляющих собой простые гидриды ( $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ). Такие первичные атмосферы повсеместны. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун являются примерами больших первичных атмосфер.

Планетезимали и протопланеты, аккреция которых во внутренней области туманности привела к образованию планеты Земля, также были погружены в первичную  $H_2$ -доминантную атмосферу. К сожалению, в геологической истории Земли практически не осталось свидетельств о первичной атмосфере. Возможно, что запасы Ne в мантии – это и есть отпечаток первичной атмосферы, но очень низкие плотности инертных газов по отношению к химически реактивным летучим элементам, таким как углерод, водород, азот и сера указывают на то, что у них были существенно разные эволюционные истории. Это различие хорошо иллюстрируется на примере азота и неона. Азот является самым летучим элементом, за исключением водорода и инертных газов. Азот и неон имеют очень похожие значения солнечного содержания и поэтому должны были бы иметь примерно равные обилия в солнечной туманности, у них подобные атомные веса, что уравнивает их скорости убегания из атмосферы, но в земной атмосфере их отношение  $Ne/N$  равно лишь  $10^{-5}$ .

Когда солнечный газовый диск был рассеян, то первичные атмосферы планет земного типа могли быстро улетучиться [Lammer и др. 2014; Massol и др., 2016]. Однако прежде чем была потеряна первичная атмосфера, она могла повлиять на окислительно-восстановительное состояние планетезималей напрямую или косвенно, будучи источником восстановления твердых веществ, из которых впоследствии была сложена планета. Например, азотистая органика или сильно восстановленные нитриты могли быть синтезированы в первичной атмосфере и осаждены в виде твердого вещества на поверхность, и, таким образом, сохраниться, когда атмосфера была утеряна [Massol и др., 2016].

## **2. Ранние атмосферы планет земной группы**

Для всех планет земной группы временные масштабы потери (или диссипации) первичных атмосфер, захваченных из туманности на стадии формирования, коротки [Lammer и др., 2014]. После потери первичных атмосфер планеты земной группы в Солнечной системе прошли разные пути эволюции. Венера, вероятно, быстро потеряла свои океаны посредством

атмосферного убегания из-за своей близости к Солнцу, которое сделало ее среднюю атмосферу влажной, что облегчило УФ диссоциацию паров воды с сопутствующим убеганием водорода из атмосферы [Kasting & Pollack 1983; Chassefiere, 1997]. Из последних работ следует, что отсутствие океана на Венере является совместным результатом быстрого вращения и близости к Солнцу.

Концентрация водорода могла повлиять на климат ранней Земли, так как было предложено, что индуцированное столкновениями поглощение солнечного излучения водородом и азотом могло бы обеспечить эффект нагрева, чтобы решить проблему слабой светимости молодого Солнца [Wordsworth & Pierrehumbert, 2013]. Ответ на вопрос о том, сохранила или нет Земля обогащенную водородом атмосферу в архейскую эпоху, также в значительной степени зависит от модели атмосферного убегания [Tian и др., 2005]. Однако проблема концентрации водорода в атмосфере Земли в архейскую эпоху до сих пор плохо изучена.

Плотная атмосфера  $\text{CO}_2$  с небольшими примесями  $\text{CH}_4$  необходима для того, чтобы ранний Марс был теплым и влажным [Kasting, 1991; Wordsworth и др., 2016]. Если Марс был сформирован из планетезималей, аналогичных тем, из которых образовались Земля и Венера, то планета должна иметь исходную  $\text{CO}_2$  атмосферу с давлением на поверхности, превышающим 10 бар. Поскольку масса Марса является лишь одной десятой от массы Земли, то планета, возможно, была не в состоянии поддерживать  $\text{CO}_2$  атмосферу с давлением более 1 бар на ранней стадии ноахейской эпохи [Tian и др., 2009]. Все эти модельные верхние пределы выше нынешнего марсианского атмосферного давления, но ниже, чем давление, достаточное, чтобы поддерживать теплый и влажный климат на раннем Марсе.

До недавнего времени роль атмосферного убегания в эволюции экзопланет не была детально исследована. Вскоре после наблюдения протяженного водородного облака вокруг транзитного горячего юпитера HD209458b [Vidal-Madjar и др., 2003], несколько исследовательских групп независимо разработали модели [Yelle, 2004, Garcia Munoz, 2007; Bisikalo и др., 2013; Shaihkislamov и др., 2014], чтобы исследовать убегание в гидродинамическом режиме из атмосфер горячих юпитеров. Однако эти исследования не позволили полностью изучить историю эволюции на больших временах экзопланет на близких орбитах (close-in exoplanets), частично из-за предполагаемых больших неопределенностей в факторах, влияющих на результаты моделей (поток энергии в диапазоне жесткого ультрафиолетового звездного излучения (XUV), эффективность нагрева, который преобразует поглощенную энергию фотонов в теплоту, и т. д.). Хотя мы не можем вернуться назад во времени, чтобы наблюдать убегание из планет земной группы в ранней Солнечной системе, наблюдения экзопланетных атмосфер при сильном излучении родительской звезды предоставляют прекрасные

возможности для проверки нашего теоретического понимания этого ключевого процесса, влияющего на эволюцию планеты [Massol и др., 2016].

### **3. Планетные верхние атмосферы, нагрев и диссипация**

На основании тепловой структуры можно определить планетную верхнюю атмосферу как область, где наблюдается положительный градиент температуры. В этом определении верхняя атмосфера совпадает с так называемой термосферой и дополняется сверху экзосферой. Термосфера нагревается за счет поглощения солнечного или звездного излучения в диапазонах мягкого рентгена (soft X-rays, от 1 до 10 нм) и жесткого ультрафиолета (EUV, от 10 до 100 нм). Эти фотоны обычно называются XUV фотонами. Так как энергия большинства XUV фотонов превышает порог ионизации по существу всех атмосферных молекул и атомов, и сечения поглощения газов для XUV фотонов велики, это приводит к поглощению XUV фотонов в высоких слоях атмосферы с относительно низкой плотностью газа. Сочетание достаточно высокой скорости поглощения энергии и низкой локальной плотности приводит к тому, что термосфера является более горячей, чем подстилающая (нижняя) атмосфера.

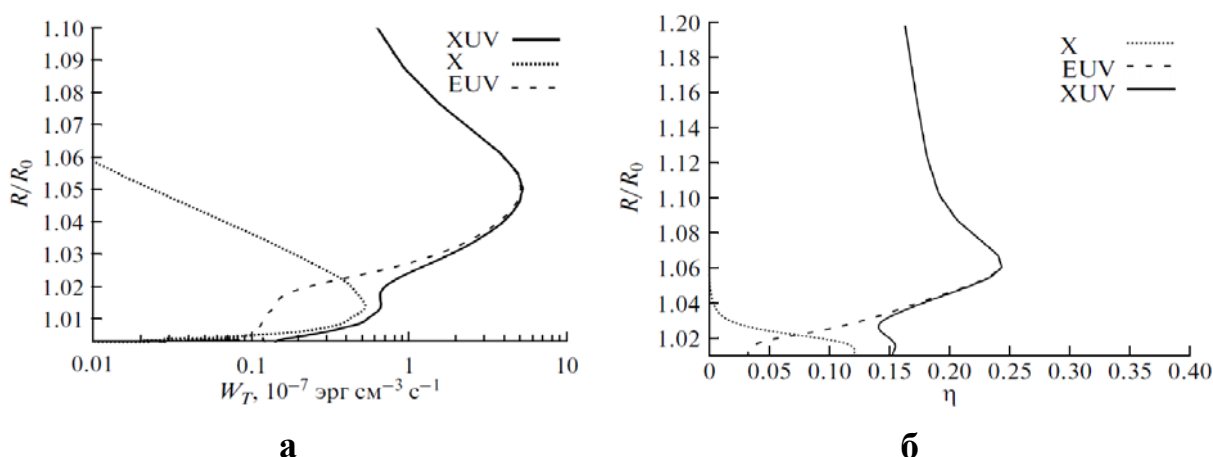
В термосфере Земли температура составляет  $\sim 900\text{K}$  в минимуме и  $\sim 1500\text{K}$  в максимуме солнечной активности, причем солнечный XUV поток энергии изменяется на фактор  $\sim 3$  в ходе солнечного цикла. Наиболее важными радиационными охлаждающими агентами в термосфере Земли являются молекулы  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}$  в нижней термосфере и атомарный кислород в верхней атмосфере. Для сравнения, термосферы Венеры и Марса гораздо холоднее,  $200 \sim 300\text{K}$ , но гораздо более стабильны по отношению к изменениям солнечной XUV радиации, потому что доминирующим газом в атмосферах этих планет является  $\text{CO}_2$ . С другой стороны, температуры термосфер Юпитера и Сатурна с преобладанием водорода и гелия достигают значений порядка  $1000\text{K}$  из-за относительной слабой способности водорода и гелия к радиационному охлаждению, несмотря на их большие расстояния от Солнца. Есть и другие источники энергии и ионизации в дополнение к звездным фотонам. В полярных областях Земли линии магнитного поля открыты для проникновения плазмы солнечного ветра или из магнитосферы Земли, где частицы могут ускоряться при помощи различных процессов. Таким образом, термосфера в полярных регионах открыта для столкновений этих энергичных заряженных частиц и может быть нагрета за счет процесса высыпания частиц с высокими кинетическими энергиями [Бисикало, Шематович, 2015]. Кроме того, ионы и электроны в ионосфере ускоряются в магнитном поле планеты и, таким образом, возникает разность скоростей по сравнению с нейтральными компонентами в термосфере. Столкновения между ионами/электронами и нейтральными атмосферными частицами приводят к так называемому джоулевскому нагреву, который оказывается выше, чем нагрев солнечным XUV излучением в по-

лярных областях Земли. В среднем, после глобального усреднения, нагрев солнечным XUV излучением доминирует над этими и другими механизмами нагрева (высыпание энергичных частиц, джоулевский нагрев, и т.д.) в термосферах Земли, Марса, Венеры, Титана, и планет-гигантов.

Для фотонов с более высокой энергией может происходить ионизация, в которой нейтральная частица превращается в пару – ион и электрон. Ион может передавать свою потенциальную энергию и заряд нейтральным компонентам атмосферы через химические реакции. Важным классом химических реакций являются так называемые реакции переноса заряда, которые протекают наиболее быстро в случае, если два реагента имеют аналогичную потенциальную энергию. Хорошим примером может быть реакция между Н и О ( $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}^+$  и  $\text{H} + \text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}$ ). Реакции рекомбинации являются процессами, посредством которых ионные компоненты возвращаются в нейтральное состояние. Из-за фундаментальных законов сохранения энергии и импульса, реакции радиационной рекомбинации происходят для атомных ионов, таких как  $\text{H}^+$ . Однако эти процессы являются значительно более медленными, чем реакции диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов (ДРМИ), такие как  $\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$ . Отметим, что в этих реакциях ДРМИ образуются нейтральные фрагменты в возбужденных состояниях и, таким образом, кинетическая энергия продуктов реакции ДРМИ зависит от того, в каком потенциально возможном канале формируются нейтральные фрагменты исходного молекулярного иона. Для малых планет, таких как Марс, кинетическая энергия образовавшихся в реакциях ДРМИ фрагментов может быть достаточно большой, чтобы эти фрагменты могли убежать из атмосферы. Это так называемый механизм фотохимического убегания [Johnson и др., 2008]. Электрон, образовавшийся в реакции фотоионизации, называют фотоэлектроном, и он может нести гораздо больше энергии, чем переносимая ионом потенциальная энергия, если поглощенный фотон имеет гораздо большую энергию, чем порог ионизации компоненты. В этом случае фотоэлектрон будет иметь достаточно энергии, чтобы вызвать дополнительное возбуждение, диссоциацию и ионизацию. Первичный энергичный фотоэлектрон может привести к образованию другого (вторичного) электрона с меньшей, но все еще высокой энергией, достаточной для последующей ионизации. Фотоэлектроны должны рассматриваться как надтепловые частицы, так как при фотоионизации они образуются с немаксвелловским распределением по скоростям, то для расчета их кинетики и переноса необходимо решать уравнение Больцмана. Таким образом, необходимо учитывать все эти вторичные электроны, чтобы правильно отслеживать поток и ионизационные потери энергии. В присутствии планетного магнитного поля движение фотоэлектронов и вторичных электронов должно быть ограничено, что дополнительно усложняет расчеты каскада электронного переноса и деградации потока [Shematovich и др., 2008; Shematovich и др., 2014].

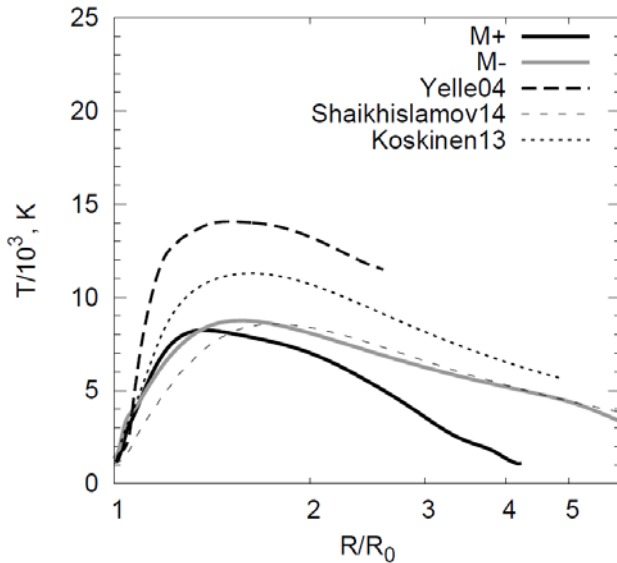
### 3.1. Нагрев атмосферы

Для чистых водородных атмосфер многие из выше упомянутых процессов могут не применяться. Тем не менее, даже небольшое количество других молекул, таких как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  и т.п., могут изменить химию и сеть потоков энергии в планетных верхних атмосферах. Таким образом, целесообразно обратить внимание на то, какие именно компоненты и процессы вовлечены в поглощение энергии фотона в планетных верхних атмосферах. Так, например, в наших работах [Shematovich и др., 2014; Ионов, Шематович, 2015; Shematovich и др., 2015; Ионов и др., 2017] исследованы изменения распределения температуры первичной атмосферы, обогащенной молекулярным водородом, под воздействием высокого потока XUV солнечного/звездного излучения. Высокие скорости ионизации и фотохимии в конечном итоге приводят к нагреву и последующему расширению верхних слоев атмосферы и к образованию надтепловых атомов, которые также могут влиять на энергетический баланс в термосфере планеты (рис. 1а и б).



**Рис. 1.** **а** – Профиль интенсивности нагрева атмосферы горячего юпитера HD209458b излучением звезды, рассчитанный для солнечного спектра и отдельно для рентгеновского и крайнего УФ диапазона. Пунктирной линией показана интенсивность нагрева рентгеновским излучением. **б** – Общая эффективность нагрева для базовой модели XUV (сплошная линия) и ее составляющие – модель EUV (штриховая линия) и модель X (мягкий рентгеновский диапазон, пунктирная линия).

С помощью газодинамической модели [Ионов и др., 2017] были исследованы динамика и изменение химического состава водородно-гелиевой атмосферы горячего юпитера HD 209458b. Были получены высотные профили основных характеристик верхней атмосферы экзопланеты-гиганта: температуры (рис. 2), скорости, плотности, темпа оттока, степени ионизации и числа Маха. В зависимости от состава атмосферы и эффективности нагрева состояния верхних атмосфер могут меняться от гидростатического к гидродинамическому режиму (рис. 2).



**Рис. 2.** Радиальные профили температуры атмосферы горячего юпитера HD209458b с учетом (M+) и без учета (M-) кинетики и переноса фотоэлектронов [Ионов и др., 2017]. Показано сравнение с результатами расчетов газодинамических моделей других авторов [Yelle, 2004; Koskinen и др., 2013; Shaikhislamov и др., 2014].

На основе полученных значений плотности и скорости на определенном радиусе можно получить оценки темпа потери атмосферы. Известна оценка скорости потери атмосферы  $\sim 10^{10}$  г/с, выведенная из наблюдений на космическом телескопе им. Хаббла газовой водородной оболочки горячего юпитера HD 209458b [Vidal-Madjar и др., 2003]. В актуальных газодинамических моделях получены следующие значения темпа потери атмосферы: (а) газодинамические модели Koskinen и др. [2013] –  $4 \times 10^{10}$  г/с; Shaikhislamov и др. [2014] –  $7 \times 10^{10}$  г/с; (б) наши расчеты скорости гидродинамического оттока атмосферы – модель (M-) –  $4 \times 10^{10}$  г/с; модель (M+) –  $8 \times 10^9$  г/с. Несмотря на различия в деталях моделей (численные методы решения, предполагаемые основные атмосферные компоненты и химическая сложность среды), эти модели все соответствуют наблюдениям облака водорода до определенной степени. Более интересно, с эволюционной точки зрения, что расчетные скорости потери водорода, полученные в этих моделях, совпадают друг с другом в пределах фактора порядка нескольких величин.

### 3.2. Атмосферное убежание

Плотность атмосферы планеты уменьшается с увеличением высоты, и достигаются высоты, выше которых молекулы могут пробегать расстояния планетарного масштаба с очень малой вероятностью столкновения. На таких высотах атомы или молекулы, которые имеют энергию больше, чем их гравитационная энергия, могут убежать в открытое пространство, если их радиальная скорость направлена вверх. Эта область в атмосфере называется экзосферой или планетной короной. Нижняя граница этой области называется экзобазой, которая определяется как такая высота, где высота однородной атмосферы сравнивается со средней длиной свободного пробега между столкновениями. Экзобаза является высотой в атмосфере, над которой лишь несколько столкновений между частицами происходят. С

кинетической точки зрения, любая частица вблизи экзобазы с направленной вверх скоростью, превышающей скорость убегания из гравитационного поля планеты, может покинуть планетную атмосферу. Высокая скорость частиц может быть достигнута во многих процессах. Процессы, в которых высокая скорость частиц обусловлена именно температурой экзобазы, называют тепловым убеганием.

При тепловом убегании доля покидающих атмосферу частиц регулируется локальной температурой. Если атмосфера вблизи экзобазы находится в гидростатическом равновесии, локальное распределение частиц по скоростям следует распределению Максвелла, и убегание называется джинсовским убеганием [Chamberlain, 1963]. Соотношение между гравитационной и кинетической энергиями частиц вблизи экзобазы часто называют джинсовским параметром убегания. Когда этот параметр близок к единице, то гравитация планеты слабо связывает ее атмосферу, и верхняя атмосфера отклоняется от гидростатического равновесия, и в этом случае локальное распределение частиц по скоростям может быть описано распределением Максвелла со сдвигом по скорости [Yelle 2004, Volkov и др., 2011], с внешней скоростью, увеличивающей вероятность убегания частиц вблизи экзобазы. Традиционно этот сценарий убегания называется гидродинамическим оттоком или убеганием, или планетным ветром, по аналогии с солнечным ветром [Parker 1964; Watson и др., 1981]. Так как именно температура верхних слоев планетной атмосферы определяет режим убегания из атмосферы в обоих рассмотренных выше случаях, то джинсовское убегание и гидродинамическое убегание являются особыми случаями теплового убегания: при джинсовском убегании диссипация атмосферы не изменяет распределение частиц по скоростям (другими словами, температуры) вблизи экзобазы; при гидродинамическом убегании температура и распределение скоростей частиц в верхней термосфере находятся под сильным влиянием режима атмосферного убегания.

Характерным примером потери атмосферы за счет гидродинамического убегания является водород-гелиевая атмосфера горячего юпитера HD209458b. Так как планета находится на очень близкой к родительской звезде орбите ( $\sim 0.045$  а.е.), то ее верхняя атмосфера подвержена сильному воздействию XUV излучения, в результате которого происходит разогрев термосферы (см. рис. 2) и переход состояния атмосферы в гидродинамический режим. Выше были приведены скорости потери атмосферы за счет режима гидродинамического убегания. Известно, что режим и темп оттока атмосферы определяется не только состоянием атмосферы, но и параметрами звездного ветра. Соответственно, при помощи трехмерной газодинамической модели воздействия на водородную атмосферу звездного ветра [Бисикало и др., 2013] была проведена интерпретация наблюдений на КТХ [Vidal-Madjar и др., 2003] протяженной водородной атмосферы HD209458b. Показано, что в зависимости от положения точки лобового

столкновения между планетной атмосферой и газом звездного ветра все газовые оболочки вокруг горячих юпитеров можно разделить на два класса: (а) если точка лобового столкновения лежит внутри полости Роша планеты, то оболочки имеют почти сферическую форму классической атмосферы, слегка искаженную воздействием звезды и взаимодействием с газом звездного ветра; (б) если точка лобового столкновения находится за пределами полости Роша, то начинается истечение через окрестности точек Лагранжа L1 и L2, и оболочка становится либо замкнутой, либо незамкнутой, и существенно несимметричной (рис. 3).

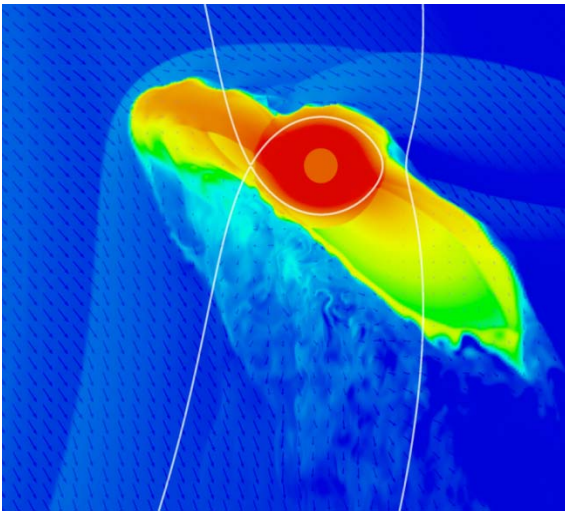


Рис. 3. Газовая оболочка планеты HD209458b становится существенно несимметричной под воздействием звезды и газа звездного ветра в результате истечения атмосферного газа через окрестности точек Лагранжа L1 и L2 [Бисикало и др., 2013].

Нетепловые процессы убегания из атмосферы происходят, когда скорости убегающих частиц не зависят от температуры экзобазы. Большинство нетепловых процессов убегания связано с наличием ионов и их поведением в электрическом и магнитном полях. Фотохимическое убегание – это нетепловой процесс убегания, важный для Марса, но вряд ли он будет эффективным механизмом убегания для Земли или супер-земель, потому что максимальная кинетическая энергия атома кислорода, приобретаемая в реакции диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$ , является не выше нескольких эВ, т.е. ее значение ниже энергии убегания для планеты более массивной, чем Марс. Процессы нетеплового убегания могут влиять на переход планетных верхних атмосфер от гидростатического к гидродинамическому режиму, когда, например, учитываются процессы перезарядки между газом планетной короны и плазмой звездного ветра [Bisikalo и др., 2015]. Удобно связать поток входящей звездной XUV энергии и скорость убегания из атмосферы планеты с эффективностью убегания. Для этого необходим детальный учет, чтобы отслеживать не только все потоки энергии, протекающей через сети атмосферной химии, но также учитывать и энергию, переносимую в пределах термосферы с помощью фото- и вторичных электронов. Таким образом, расчеты эффективности нагрева, т.е., соотношения между энергией накопленной окружающим атмосферным газом в

виде тепла и поглощенной энергией звездных XUV фотонов, еще более усложняется [Shematovich и др., 2014, 2015]. Актуальные оценки относительной значимости тепловых и нетепловых механизмов убегания для планет земной группы в Солнечной системе приведены в недавнем обзоре [Johnson et al., 2008].

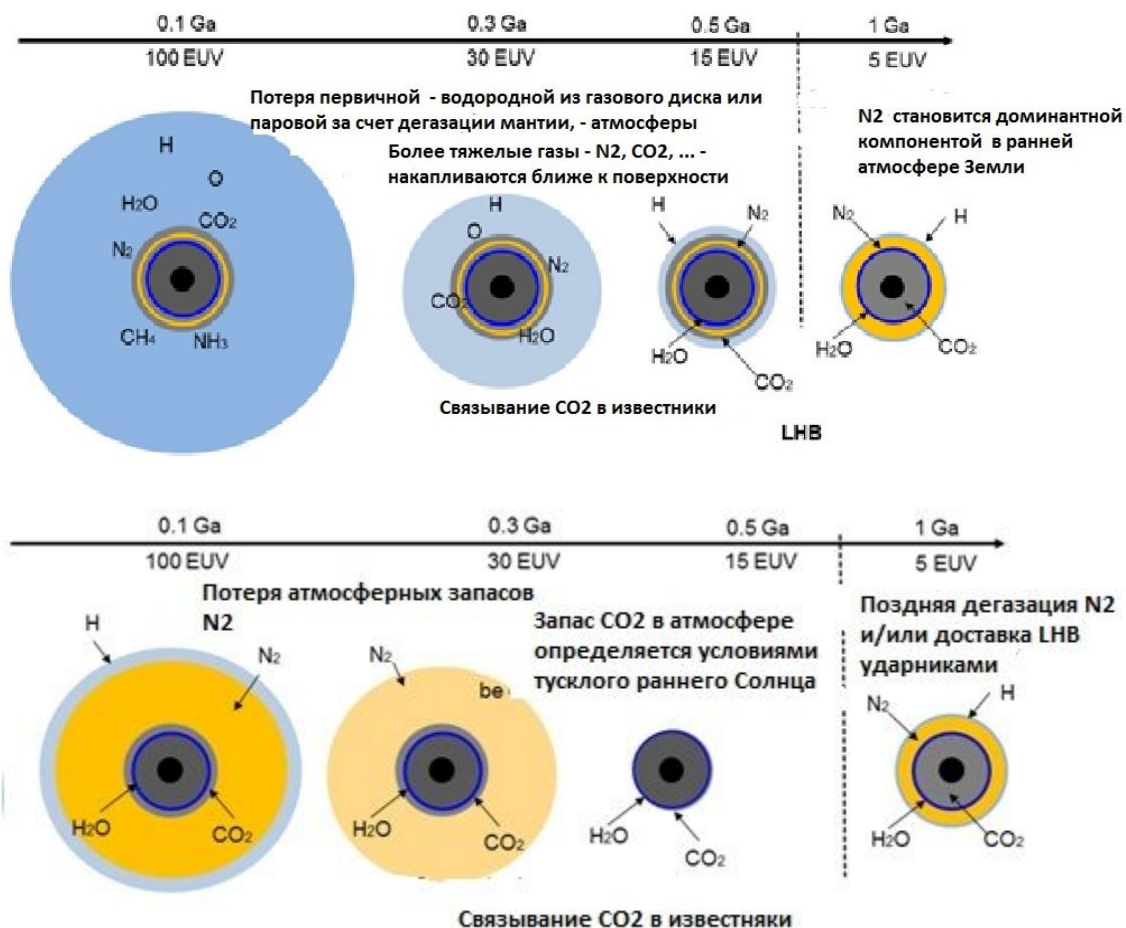
### **5. Ранняя атмосфера Земли в свете изучения образования и диссипации атмосфер экзопланет**

Из анализа наблюдений и результатов моделирования экзопланетных атмосфер под воздействием родительских звезд следует, что после образования планеты происходит гидродинамический отток первичной атмосферы, приводимый в действие вследствие поглощения и нагрева атмосферы крайним УФ излучением звезды. По мере уменьшения потока крайнего УФ излучения режим потери атмосферы меняется от гидродинамического расширения термосферы к испарению в гидростатическом режиме. Во время этого перехода различные нетепловые процессы потери атмосферы начинают работать и вносить свой вклад в общие атмосферные потери. После того, как поток крайнего УФ излучения молодой и активной звезды уменьшается до умеренного уровня (<5 современного потока солнечного XUV излучения) и газы CO<sub>2</sub> или N<sub>2</sub> становятся основной компонентой термосферы, все процессы диссипации атмосферы будут способствовать атмосферным потерям, но с гораздо более низкими или даже незначительными последствиями для атмосферы по сравнению с ранней активной в диапазоне УФ фазой молодой звезды.

На рис. 4 представлен возможные сценарии образования ранней атмосферы Земли согласно [Lammer и др., 2014; Massol и др., 2016]. После ударной (катастрофической) дегазации горячая паровая (H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>) атмосфера подвержена воздействию сильного потока крайнего УФ излучения молодого Солнца, что приводит к образованию протяженной водородной экзосферы за счет диссоциации молекул H<sub>2</sub>O. В отличие от Венеры, орбита которой ближе к Солнцу, солнечная светимость на Земле была слабее, так что атмосфера охлаждается быстрее до того состояния, когда оставшийся водяной пар может конденсироваться и приводить к образованию земного водного океана. Молекулы CO<sub>2</sub> осаждаются из атмосферы на ранние континенты и связываются в литосфере в виде известняков, а азот становится основным газом в атмосфере. Кроме газы выделения из вулканов, летучие вещества также могут поставляться в атмосферу в период поздней тяжелой бомбардировки (LHB).

Таким образом, наблюдения и теоретические модели атмосфер экзопланет, подверженных воздействию экстремальных потоков жесткого излучения родительской звезды, предоставляют замечательную возможность для проверки нашего теоретического понимания этих ключевых процессов – тепловой и нетепловой диссипации, влияющих как на эволюцию плане-

ты, так и ее атмосферы, в частности Земли, на ранних стадиях. Можно ожидать, что будущие наблюдения экзопланет представят более сильные ограничения и приведут к улучшению моделей диссипации атмосферы, а их применение приведет к лучшему пониманию палеоклимата и эволюции планет земной группы в Солнечной системе.



**Рис. 4.** Возможные сценарии образования ранней атмосферы Земли (из работы [Lammer и др., 2014]). Исходная протоатмосфера: (*верхняя панель*) накоплена за счет аккреции молекул H<sub>2</sub> из газового диска; (*нижняя панель*) пары H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, ... за счет дегазации мантии. Возраст звезды и планеты в млрд. лет, а также активность звезды в диапазоне XUV относительно современного уровня активности Солнца показаны в течение времени стрелкой слева направо.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Программы Президиума РАН № 07 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные взрывные процессы в астрофизике».

#### Литература

Бисикало Д.В. и др. Астрон. ж. **90** 779 (2013).  
 Бисикало Д.В., Шематович В.И. Астрон. ж., **59** 836 (2015).  
 Ионов Д.Э., Шематович В.И. Астрон. Вестн. **49** 373 (2015).

- Ионов Д.Э., Шематович В.И., Павлюченков Я.Н.* Астрон. ж., **94** (в печати) (2017).  
*Bisikalo D.V. et al.* *Astrophys. J.* **764** 19(5pp) (2013)  
*Bisikalo D.V. et al.* in: *Characterizing stellar and exoplanetary environments* (Eds. Lammer H., Khodachenko M) (Springer, Astrophysics and Space Science Library, 411, 2015) p. 81.  
*Chamberlain J.W.* *Planet. Space Sci.* **11** 901 (1963).  
*Chassefière E.* *Icarus* **124** 537 (1997).  
*García Muñoz A.* *Planet. Space Sci.* **55** 1426 (2007).  
*Johnson R.E. et al.* *Space Sci. Rev.* **139** 355 (2008).  
*Kasting J.* *Icarus* **74** 472 (1991).  
*Kasting J.F., Pollack J.B.* *Icarus* **53** 479 (1983).  
*Koskinen T.T. et al.* *Icarus* **22**, 1695 (2013).  
*Lammer H. et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **439**, 3225 (2014).  
*Massol H. et al.* *Space Sci. Rev.* **205** 153 (2016).  
*Marov M.Ya., Shematovich V.I., Bisikalo D.V.* *Space Sci. Rev.* **76** 1 (1996).  
*Parker E.N.* *Astrophys. J.* **139** 72 (1964).  
*Shaikhislamov I.F. et al.* *Astrophys. J.* **795** 132 (2014).  
*Shematovich V.I. et al.* *J. Geophys. Res.* **113** E02011 (2008).  
*Shematovich V.I., Ionov D.E., Lammer H.* *Astron. Astrophys.* **571** A94 (2014).  
*Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Ionov D.E.* in: *Characterizing stellar and exoplanetary environments* (Eds. Lammer H., Khodachenko M.) (Springer, Astrophysics and Space Science Library, 411, 2015) p. 105.  
*Shizgal B.D, Arkos G.G.* *Rev. Geophys.* **34** 483 (1996).  
*Tian F. et al.* *Science* **308** 1014 (2005).  
*Tian F., Kasting J.F., Solomon S.C.* *Geophys. Res. Lett.* **36** L02205 (2009).  
*Vidal-Madjar A. et al.* *Nature* **422** 143 (2003).  
*Volkov A. et al.* *Astrophys. J.* **729** L24 (2011).  
*Watson A.J. et al.* *Icarus* **48** 150 (1981).  
*Wordsworth R., Pierrehumbert R.* *Science* 339 64 (2013).  
*Wordsworth R. et al.* arXiv:1610.09697 (2016).  
*Yelle R.V.* *Icarus* **170** 167 (2004).

### **Chapter 13**

## **EARTH'S EARLY ATMOSPHERE IN THE LIGHT OF EXOPLANET STUDIES**

© **V.I. Shematovich**

*Institute of Astronomy RAS,  
Moscow, Russia*

Review of current approaches to the study of formation and evolution of early Earth's atmosphere is presented basing on the data of comparative planetary geology. Recent intensive studies of the atmospheres of the planets in the Solar and extrasolar planetary systems have led to the improvement of our knowledge about the formation and evolution of protoatmospheres of celestial bodies at the earliest stages of the planetary system formation [Massol et al., 2016]. Proto- or primary atmosphere of planet now is associated with the following scenario of the formation. When the protoplanetary core accretes the matter and grows in-

side a gaseous disk, it can capture the basic – H<sub>2</sub>, He, and the admixture gases from the disk. When the gas is evaporated from the disk, the planetary core, surrounded by an gas envelope of H<sub>2</sub> and He, is exposed to the intense fluxes of stellar radiation in the X-ray and extreme ultraviolet wavelength's ranges and stellar wind plasma from the young host star. This time period can be considered as a beginning of the dissipation of the primary atmosphere. The main role is played by the processes of thermal escape in the modes of evaporation and/or hydrodynamic outflow of the atmospheric gas. The modern models of thermal and non-thermal escape used to study the loss of the Earth's primary atmosphere and the formation and evolution of the secondary atmosphere are discussed in this review.

*Глава 16*

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ  
В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛИ**

© П.Г. Коваadlo, А.Ю. Шиховцев, С.А. Язев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

*Иркутский государственный университет Иркутск, Россия*

Как показывают исследования истории Земли как планеты, число и энергетическая мощь катастрофических событий в ходе эволюции уменьшалась. Земля «подстроилась» под влияние внешних факторов, а внутренние источники энергии ослабли. На это указывает, прежде всего, относительная стабильность климатических характеристик в течение миллионов лет.

Современное повышение приповерхностной температуры Земли за последние полторы сотни лет является доказанным на основе рядов сетевых инструментальных гидрометеорологических наблюдений. Авторами исследования предложена гипотеза, объясняющая наблюдаемое потепление климата. Предполагается, что в прошлом на месте Северного Ледовитого океана существовала суша с замкнутыми водоемами. Расчет и наблюдения показывают, что без доступа теплых океанических вод в полярной зоне возникают условия для образования и роста многолетних ледников. Нарастание массы Арктического ледового щита привело к проседанию земной коры под действием его веса. Низменные равнины подо льдом оказались ниже уровня океана.

Доступ океанических вод к ледовому щиту привел к омыванию его основания водами Атлантики и Тихого океана. Теплые воды в значительной степени разрушили плавающую часть ледового щита. Тепло, которое тратилось на таяние льда, сейчас идет на разогрев атмосферы и океана. В настоящее время наблюдается завершающий этап этого процесса, что является основной причиной наблюдаемого потепления.

Современная точка зрения на происхождение Земли, принятая «большинством голосов», полагает, что, как и другие планеты Солнечной системы, она возникла в результате конденсации космического вещества из протопланетного газопылевого облака. Отметим, что начальный этап возникновения Земли является катастрофическим нелинейным событием, в результате которого новое образование приобрело и новые свойства, которыми не обладали составившие её элементы. На следующем этапе эволюции вследствие выпадения космической пыли и метеоритов масса Земли увеличивалась, что происходит и до сих пор. Кроме этого, происходило и формирование тела Земли за счет ее разогрева в результате уплотнения – расплавление и постепенное охлаждение ее наружных слоев с образованием твердой оболочки – земной коры. Протопланета в результате катастрофических нелинейных событий перешла в новое состояние с другим набором свойств, уже близким к современному.

В процессе эволюции планеты изменялась и ее атмосфера, которая возникла на самом первом этапе. Считается, что первичная атмосфера бы-

ла утрачена из-за малой массы планеты. Газы, в первую очередь, легкие (водород и гелий) ушли в окружающее пространство.

К тому времени, когда масса планеты увеличилась, и сила гравитации смогла удерживать газы, образующиеся внутри горячей планеты, начала формироваться вторичная атмосфера. В процессе эволюции поверхность Земли изменялась и продолжает изменяться под действием внешних и внутренних воздействий: импактных событий, вулканизма и других. Каждое катастрофическое событие в той или иной степени изменяет свойства самой планеты и ее атмосферы. Однако как показывают исследования истории Земли, число и энергетическая мощь катастрофических событий со временем уменьшается. Земля «подстроилась» под влияние внешних факторов, а внутренние источники энергии ослабли. На это указывает, прежде всего, относительная стабильность климатических характеристик (прежде всего, средней планетарной температуры) в течение последних нескольких сотен миллионов лет.

Если принять за основу изложенную цепочку эволюционных событий, то в настоящем и будущем можно надеяться, что процесс развития не предполагает мировой катастрофы с экстремальной перестройкой климатической системы и переходом ее в другое состояние гомеостаза. С этой точки зрения глобальное потепление, свидетелями которого мы являемся, как показывают косвенные признаки, будет достаточно продолжительным, но не катастрофическим. Такой сценарий наиболее вероятен при условии соблюдения разумного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли.

В настоящее время факт повышения приповерхностной температуры Земли за последние полторы сотни лет является доказанным на основе рядов сетевых инструментальных гидрометеорологических наблюдений. Наибольшее повышение температуры воздуха отмечается в холодный период года, при этом темп роста температуры в высоких широтах Северного полушария оказывается выше, чем в низких.

Авторами настоящей главы предложена гипотеза, объясняющая наблюдаемое потепление климата. Предполагается, что в прошлом на месте Северного Ледовитого океана существовала суша с замкнутыми водоемами. Нарастание массы Арктического ледового щита привело к проседанию земной коры под действием его веса. Низменные равнины подо льдом оказались ниже уровня океана. Доступ океанических вод к ледовому щиту привел к омыванию основания ледового щита водами Атлантики и Тихого океана. Теплые воды разрушили плавающую часть ледового щита. Остались только сухопутные ледники, одним из самых крупных является Гренландский ледник. В настоящее время наблюдается завершающий этап этого процесса. Таким образом, согласно нашей гипотезе, освобождение приполярных областей северного полушария ото льда является основной причиной наблюдаемого потепления.

По данным наблюдений в приземном слое атмосферы выше 35° с.ш. и 40° ю.ш. бюджет средней годовой энергии излучения превышает энергию

прихода падающей солнечной радиации [1–3]. Отрицательный баланс компенсируется теплом, принесенным атмосферными и океаническими течениями из низких широт. При недостатке тепла в указанных областях как на суше, так и на воде, формируется ледниковый покров, который может со временем разрастаться и усиливать процесс выхолаживания. Известно, что полярные ледники активно влияют на изменения глобальной температуры атмосферы и океана, а также на другие климатические характеристики.

Для того чтобы проследить динамику этого процесса, целесообразно оценить отепляющее действие и тенденции временных изменений основных потоков тепла, поставляемого в полярную область атмосферными и океаническими течениями и прямой солнечной радиацией. Основной задачей здесь является оценка условий образования и таяния льда в определенные сезоны года. В задачу также входит отдельная оценка потоков тепла, поступающего в полярные области от каждого из перечисленных источников.

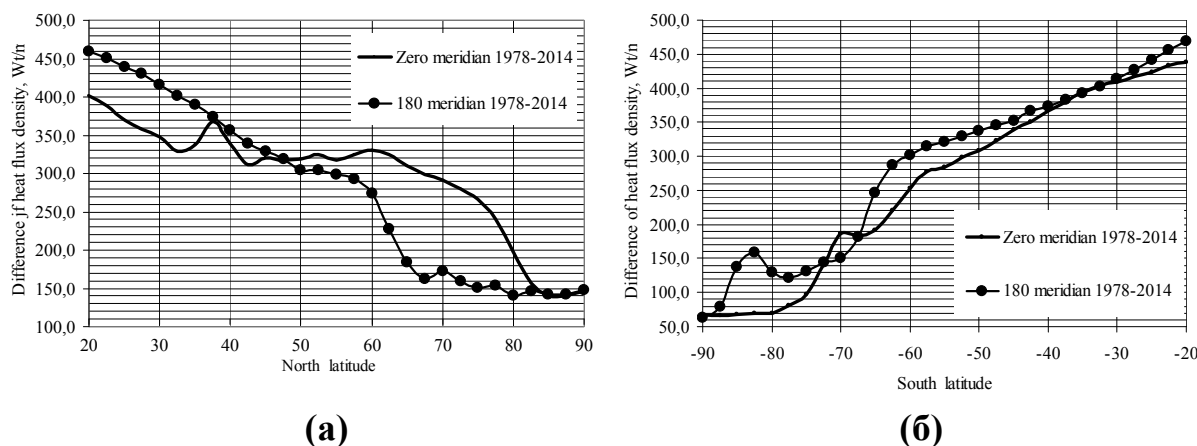
Следует отметить, что числовым индикатором циркулирующей в системе «вовлеченной» тепловой энергии является температура. Поэтому только отдельная количественная оценка каждого источника позволяет определить общую тенденцию изменения температуры, исследовать причинно-следственные связи и углубить понимание физической основы глобальных климатических изменений. После этого можно будет говорить о ближайших и далеких перспективах климатических изменений на заданной территории.

Количество вовлеченной в систему тепловой энергии можно представить численно на основе удельной плотности радиационного теплового потока (РТП) на высоте 2 м в приземном слое атмосферы. Величину РТП можно оценить в виде удельной мощности потока теплового излучения, измеряемой в единицах Вт/м<sup>2</sup>, с использованием сетевых метеоданных о температуре воздуха по известным методикам, основанным на законе Стефана-Больцмана и учитывающим влажность воздуха и облачность [4, 5].

Используя ряды накопленных справочных сетевых метеорологических данных и данных реанализа, были исследованы температурный режим планеты и его изменения с 1948 г. по 2015 г., а также условия образования и таяния плавучего льда. Особое внимание было обращено на отдельную оценку вклада в РТП солнечного тепла и тепла, поступившего с атмосферными и океаническими течениями.

Для оценки вклада каждого источника была выбрана схема, учитывающая сезонную динамику притоков тепла на различных широтах. Поскольку выше широты полярного круга в темный (ночной) период года с декабря по февраль приток солнечной радиации отсутствует, вовлекаемая энергия складывается только из атмосферного и океанического притоков тепла. Отдельная оценка этих притоков без специальных наблюдений представляется сложной задачей, однако ее с некоторой долей неопределенности можно решить, рассчитывая РТП по накопленным данным о температуре воздуха в приземном слое и ее изменениях вдоль меридианов.

Распределения РТП в приземном слое атмосферы вдоль “0” и “180” меридианов за период наблюдений с 1978 по 2014 г. показаны на рис. 1(а), (б) соответственно для Северного и Южного полушарий. Распределение РТП для “0” меридиана показано сплошной линией, для “180” меридиана – линией с круглыми маркерами. Величины РТП рассчитаны по средним значениям температуры воздуха с учетом облачности и влажности по методике [4]. “0” меридиан был выбран потому, что он пересекает полярную область, захватывая Атлантические течения с открытой водой и часть Северного Ледовитого океана, покрытого льдом на большой площади. В Южном полушарии “0” меридиан пересекает самую северную кромку плавающего ледового покрова, а “180” меридиан пересекает самую южную кромку льда, которая располагается в Тихом океане. Оценка положения ледяной кромки выполнена по космическим снимкам [Архив NASA Team Near-Real-Time Sea Ice (NRTSI)]. Реально эта граница представляет собой полосу шириной в отдельных случаях до нескольких десятков километров.



**Рис. 1.** Распределения удельной плотности радиационного теплового потока на уровне 2 м в приземном слое атмосферы Северного (а) и Южного (б) полушарий вдоль “0” и вдоль “180” меридианов в январе по многолетним данным.

Сопоставление данных, указанных на рисунке, с положением ледовой кромки вдоль этих меридианов позволила оценить величины РТП при переходе от ледяного покрова к открытой воде. Полученные значения колеблются около  $250 \text{ Вт/м}^2$ . Это означает, что при РТП ниже  $250 \text{ Вт/м}^2$  образуется устойчивый ледяной покров.

Рис. 1(а) демонстрирует, что вблизи Северного полюса в январе, согласно расчетам, средняя годовая РТП на уровне 2 м (энергия, эквивалентная вовлекаемой), составляет  $\sim 145 \text{ Вт/м}^2$ . В отсутствие притока солнечной радиации эта величина обеспечивается теплом атмосферных и подледных океанических течений. Расчеты также показывают, что радиационный поток тепла от воды сквозь лед при толщине льда и снега более 2 м не превышает  $15 \text{ Вт/м}^2$ , поэтому реалистичным можно считать, что вклад атмосферного тепла в РТП составляет  $\sim 130 \text{ Вт/м}^2$  в области морских льдов и возрастает к югу.

Таким образом, океаническое тепло последовательно добавляется к атмосферной составляющей РТП: на широте  $80^\circ$  вклад океана составляет  $70 \text{ Вт/м}^2$ , на широте  $70^\circ$  –  $160 \text{ Вт/м}^2$ . Ниже  $60^\circ$  широты общая сумма РТП возрастает уже за счет вклада солнечного тепла, от  $70 \text{ Вт/м}^2$  и выше.

Заметим, что “0” меридиан в полярной области находится в зоне действия Гольфстрима, поэтому кромка льда в январе здесь наиболее удалена к северу (рис. 1 (а)).

Для того чтобы оценить достоверность полученного значения РТП, равного  $130 \text{ Вт/м}^2$ , приносимого атмосферными течениями, представляет интерес исследовать на изменчивость этот индекс вдоль “180” меридиана, где устойчивый ледовый покров в январе распространяется до береговой линии азиатского континента – до  $70^\circ$  широты.

На рис. 1(а), можно видеть, что РТП вдоль “180” меридиана от северного полюса до  $80^\circ$  с.ш. слабо колеблется около уровня  $140 \text{ Вт/м}^2$ . Если учесть, что здесь в январе общая толщина льдов выше, чем вдоль “0” меридиана [6], можно сделать вывод, что поток океанического тепла в атмосферу снижается до  $10 \text{ Вт/м}^2$  и ниже. В результате принесенного атмосферными течениями тепла РТП остается на уровне, близком к  $135 \text{ Вт/м}^2$ . Если полагать, что атмосферная составляющая РТП до ледовой кромки слабо изменилась, можно ориентировочно оценить вклад океанического тепла в РТП на уровне  $120 \text{ Вт/м}^2$ , т. е. в переходной зоне от ледяного поля к открытой воде вклады атмосферы и океана в РТП практически уравниваются.

На рис. 1(б) на Южном полюсе РТП снижается до  $65 \text{ Вт/м}^2$ . Это тепло приносится только атмосферными течениями. В интервале широт от полюса до  $80^\circ$  ю.ш. по материковой части вдоль “0” меридиана РТП вырастает всего на  $\sim 5 \text{ Вт/м}^2$ , и только на широте  $60^\circ$  – у северной кромки плавающего ледника – достигает  $250 \text{ Вт/м}^2$ . Вдоль “180” меридиана от Южного полюса к широте  $\sim 82^\circ$  РТП аномально возрастает до  $150 \text{ Вт/м}^2$ , затем снижается к береговой линии моря Росса до  $130 \text{ Вт/м}^2$ . Это тепло также приносит только атмосфера. У кромки плавающего ледника на  $65^\circ$  широте за счет близости открытой воды Тихого океана РТП увеличивается до  $250 \text{ Вт/м}^2$ .

Полученные оценки вклада атмосферного и океанического тепла в суммарный РТП позволяют сделать ряд выводов и построить схему возможных вариантов динамики морских и сухопутных ледников в полярных областях нашей планеты. На границе льда и открытой воды суммарный РТП атмосферы и океана возрастает до  $\sim 250 \text{ Вт/м}^2$  и более. Поскольку в холодный период года атмосферные течения являются основным источником тепла, и РТП вблизи Северного полюса составляет около  $130 \text{ Вт/м}^2$ , а на границе условной ледовой кромки –  $250 \text{ Вт/м}^2$ , то вклад океанических течений в суммарную РТП можно оценить в  $120 \text{ Вт/м}^2$ . Если океанический приток тепла ограничить, тогда лед будет нарастать.

С высокой вероятностью, огромный Арктический ледовый щит начал формироваться после того, как под действием геодинамических изменений приток воды мирового океана на эту территории уменьшился. Например,

при уменьшении вклада океанического тепла в два раза, т. е. на  $60 \text{ Вт/м}^2$ , суммарный РТП оказывается ниже  $250 \text{ Вт/м}^2$ , следовательно, возникают условия для роста ледника. С ростом площади ледника приток солнечной радиации из-за увеличения альbedo поверхности продолжает снижаться, что способствует дальнейшему росту ледника.

Динамику ледника в историческом развитии гипотетически можно представить следующим образом. По мере постепенного роста массы ледника и соответствующего увеличения удельного давления на основание, развились просадочные явления, которые увеличили проливы, позволяющие теплым океаническим течениям поступать в Арктику через Норвежское, Гренландское, Баренцево и Берингово моря. Этот процесс продолжается: наблюдаемые тенденции таяния льдов приведут в перспективе к дальнейшему росту доступа теплых вод Атлантики в арктический бассейн, к морю Бофорта через Лабрадорское и Баффиново моря, а также через северо-западные проливы. По-видимому, мы оказались свидетелями окончательного разрушения многолетних плавающих льдов, а также существенного уменьшения массы сухопутных, островных и материковых льдов, включая Гренландский мегаледник. Этот процесс способствует росту суммарного РТП и дальнейшему повышению температуры воздуха и воды в регионе. В длительной перспективе рост суммарного РТП будет сохраняться до тех пор, пока масса ледников не уменьшится до определенного минимума.

Факт существенного охлаждающего действия на окружающую среду демонстрирует и Антарктический ледник, который сформировался на суше в результате недостатка тепла, приносимого на высокие широты атмосферными течениями в холодный (зимний) период. Однако в результате межполушарного обмена теплом прибрежная часть плавающих ледников и шельфа под действием теплеющей океанической воды и увеличивающегося атмосферного притока тепла из низких широт разрушается. В перспективе этот процесс будет замедлять общий темп потепления климата, тем более, что в настоящее время даже в теплый период материковая часть ледника продолжает рост, поскольку суммарный РТП с учетом притока солнечной радиации не превышает  $150 \text{ Вт/м}^2$ .

Не исключено, что подобные процессы, связанные с динамикой полярных ледников, происходили и в далеком прошлом.

### Литература

1. *Е.Г. Никифоров, А.О. Шнайхер.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного ледовитого океана. Под ред. чл.-корр. АН СССР *А.Ф. Трешникова.* Л.: Гидрометеиздат. 1980. 268 с.
2. *Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский.* Особенности проявления современного глобального потепления климата в различных регионах Северного полушария в последние десятилетия // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. Вып. 2. 2008. С. 14.
3. *Kovadlo P.G.* Polar glaciers and climate: about the causes of climate changes / *P.G. Kovadlo, S.A. Yazev* // SPIE. 2014. V. 9292. doi: 10.1117/12.2074656.

4. Ю.Р. Ситдикова, И.Н. Русин, Л.В. Козырева. Методика расчета радиационных характеристик с учетом проективного покрытия сельскохозяйственного поля // *Агрофизика*. 2012. № 4(8). С. 10–24.
5. И.Н. Русин. Обоснование формул для противоишлучения атмосферы при ясном небе. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета // *Метеорология*. 2010. №17. С. 32–40.
6. В.Ю. Александров, О.М. Йоханнессен. Изменения толщины льда в Арктике с конца XIX века // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 4 (94). С. 63–73.

## *Chapter 16*

### **CLIMATIC FEATURES OF THE HEAT DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER THE IN THE POLAR REGIONS OF THE EARTH**

© P.G. Kovadlo, A.Yu. Shikhovtsev, S.A. Yazev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

As studies of the Earth history show the energy power and amount of catastrophic events during the planet evolution has been decreasing. Gradually the Earth "was adjusted" under the influence of external factors and internal sources of energy were weakened. The relative stability of climatic characteristics over millions of years indicates this.

The modern surface Earth temperature increasing over the past 150 years has been proved by analyzing the series of network instrumental hydrometeorological measurements. The authors of this study proposed a hypothesis to explain the observed warming of the climate. It is supposed that there was a land with enclosed water reservoirs in the past at the Arctic ocean site. Calculations and observations show that there were favorable conditions for the formation and growth of the perennial glaciers` without access of warm ocean waters in the polar region. Further the mass of the Arctic ice sheet increasing led to subsidence of the earth's crust under the influence of its weight. Low-lying plains under the ice were lower than the ocean level.

The access of oceanic waters to the ice sheet led to the washing of the base by the waters of the Atlantic and the Pacific oceans. Warm waters largely destroyed the floating part of the ice sheet.

Heat which was spent on melting ice in the past warm up the atmosphere and ocean nowadays. Currently, the final stage of this process is observed and the factors discussed are the main cause of the observed warming.

## *Глава 17*

### **О МИГРАЦИИ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

© **В.М. Чепурова**

*Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ,  
Москва, Россия*

Рассматривается роль планет-гигантов в формировании Солнечной системы. Приводится исторический обзор проблемы и результаты современных моделей компьютерного моделирования.

Динамическая эволюция больших планет давно интересовала ученых. Планетологов не удовлетворяли теоретические орбиты и в середине 20-го века с появлением ЭВМ начались работы по моделированию образования Солнечной системы. Одним из первых исследователей в этом направлении был А.М. Молчанов. В 1961 г. он сделал по результатам своей работы два доклада: один на небесномеханическом семинаре в ГАИШ, второй – на международной конференции по общим и прикладным вопросам теоретической астрономии, проходившей осенью тоже в ГАИШ. Последний доклад был в более расширенном виде повторен автором на конгрессе планетологов осенью 1962 г. в Париже [1, 2]. В своей работе автор применил теорему о разделении движений, активно используемую в теории колебаний, доказав, в конечном счете, её применимость в небесной механике и выведя на основе этой теоремы «эволюционные уравнения», описывающие медленные изменения параметров орбит и не содержащие быстрых переменных, связанных с движением по орбите. Эти уравнения он численно (на ЭВМ) интегрировал на больших (сравнимых с принятым возрастом Солнечной системы) временах. В результате, он показал, что плоские круговые планетные системы являются стационарными в первом порядке по малому параметру (у него этот параметр  $\varepsilon = \Sigma m_i / \Sigma (m_i + m_0)$  где  $m_0$  – масса Солнца,  $m_i$  – массы больших планет). Выход на стационарные орбиты обеспечивается малыми диссипативными факторами. К сожалению, А.М. Молчанов рано умер, и работы его, как и он сам, оказались почти забытыми.

В 70-е годы этим вопросом, кроме всем известных работ В.С. Сафронова и его коллег, занимались Э.М. Дробышевский, обосновывавший концепцию, что система Солнце – Юпитер является предельным случаем двойной звезды [3–5], а также доказывавший, вслед за В.В. Радзиевским, что на периферии Солнечной системы на расстояниях  $\sim 50 \times 10^3$  а.е. находится планетное облако, содержащее  $\sim 10^3$  небесных тел. Н.Н. Козлов и Т.М. Энеев рассмотрели проблемы образования планет из протопланетного облака и доказали эффект кольцевого сжатия вещества [6, 7]. Кроме того, ими была построена теория подобия, позволившая установить связь между параметрами математической модели и протопланетного облака, а

также понять смысл и характер закона Бодде-Тициуса. В 80–90-х этой проблемой занимались Е.А. Гребеников и И.И. Смульский, моделировавшие эволюцию орбиты Марса на временах более 4 млрд. лет [8, 9].

В начале 21-го века, когда были открыты планетные системы других звезд, интерес к указанным проблемам резко возрос. В результате изучения экзопланетных систем и сравнения их с Солнечной системой у астрономов крепло убеждение в уникальности нашей планетной системы. В чем состоит эта уникальность?

1) Наша система, в отличие от других, почти плоская и орбиты почти круговые. Наклонения орбит больших планет к плоскости эклиптики не превышают  $7^\circ$  (у Меркурия, у остальных много меньше), а эксцентриситеты – от 0.007 (у Венеры) до 0.206 (опять-таки у Меркурия) [10].

2) В Солнечной системе внутренняя часть почти пустая, тогда как экзосистемы заполнены «супом» из планетезималей и газа.



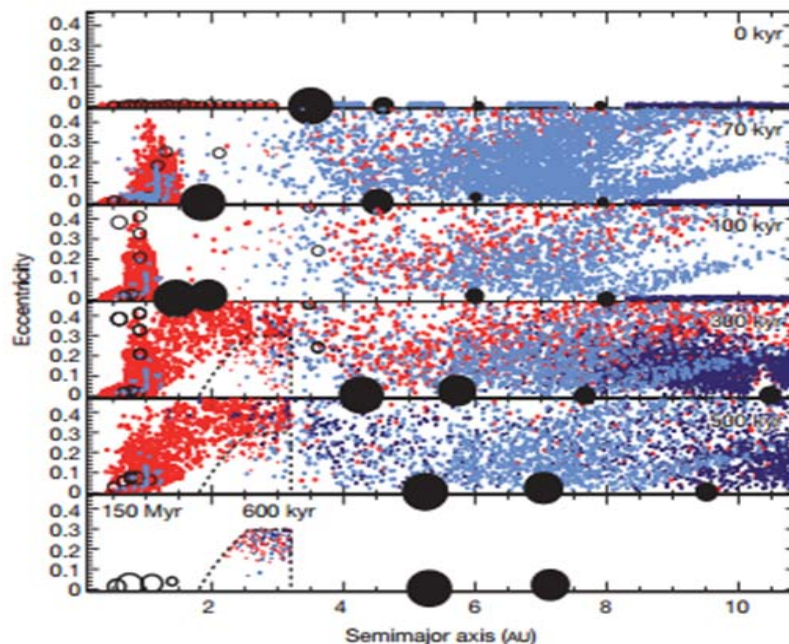
**Рис. 1.** Структура солнечной системы.

3) Солнечная планетная система состоит из каменных небольших планет земной группы и крупных внешних гигантов. Внутри орбиты Меркурия никаких объектов нет. А в большинстве экзосистем вблизи звезды очень быстро вращаются «горячие юпитеры».

Есть и другие более мелкие особенности.

Почему существует такая разница? Где просчитались теоретики? Первыми в 2001 г. попытались объяснить это различие англичане Массе и Снэллгроув [11], моделировавшие одновременную эволюцию орбит Юпитера и Сатурна в протопланетном диске Солнца. Из-за приливного взаимо-

действия планеты и диск обмениваются угловым моментом, причем, как правило, планеты теряют угловой момент (этот процесс называется миграцией) и движутся к центру («атака Юпитера» или «grand attack»). Сатурн, имеющий меньшую массу, движется быстрее, орбиты сближаются и происходит захват в резонанс 1/2 средних движений планет. Связанные резонансом планеты обмениваются импульсом и энергией друг с другом и создают в диске крутильные моменты, вызывая аккрецию вещества диска на свою поверхность, причем в силу своей большей массы Юпитер сильнее притягивает внутренний диск, чем Сатурн – внешний, что создает в диске большие пустоты. С другой стороны, аккреция и крутильные моменты в диске замедляют движение планет к центру и заставляют обе планеты изменить направление своего движения и начать удаляться от Солнца. Такую резкую смену направления миграции называют «сменой галса».



**Figure 2** | The evolution of the small-body populations during the growth and migration of the giant planets, as described in Fig. 1. Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune are represented by large black filled circles with evident inward-then-outward migration, and evident growth of Saturn, Uranus and Neptune. S-type planetesimals are represented by red dots, initially located between 0.3 and 3.0 AU. Planetary embryos are represented by large open circles scaled by  $M^{1/3}$  (but not in scale relative to the giant planets), where  $M$  is mass. The C-type planetesimals starting between the giant planets are shown as light blue dots, and the outer-disk planetesimals as dark blue dots, initially between 8.0 and 13.0 AU. For all planetesimals, filled dots are used if they are inside the main asteroid belt and smaller open dots otherwise. The approximate boundaries of the main belt are drawn with dashed curves. The bottom panel combines the end state of the giant planet migration simulation (including only those planetesimals that finish in the asteroid belt) with the results of simulations of inner disk material (semimajor axis  $a < 2$ ) evolved for 150 Myr (see Fig. 4), reproducing successful terrestrial planet simulations<sup>8</sup>.

В 2011 г. А. Морбиделли, К. Уолш и другие их коллеги из Обсерватории Лазурного берега в Ницце (Observatoire de la Côte d'Azur) провели обширное компьютерное моделирование миграции больших планет [12] и

показали, что концепция «смены галса» объясняет не только динамическую эволюцию Юпитера и Сатурна, но и малую массу Марса. Они предположили, что Юпитер, прежде чем повернуть назад, мигрировал к Солнцу до нынешней орбиты Марса (~1.5 а.е.). При этом он захватывал планетезимали и большое количество ледяных блоков из внешней зоны (более десяти масс Земли), Таким образом внутренняя зона освобождалась от лишнего каменистых обломков и газа и обогащалась льдом. Так они объясняли возникновение Марса (рисунок 2 из [12]).

Ещё в 2005 г., обратившись к «смене галса», А. Морбиделли с соавторами [13], рассмотрели, что в рамках этой концепции должно происходить с другими внешними гигантами. Так возникла модель Ниццы: после своего набега внутрь Солнечной системы, истощив газово-пылевой протопланетный диск внутри, Юпитер и Сатурн сблизилась с недавно образовавшимися гигантами. Захватив их также в резонансы, эта пара создала компактную резонансную группу из, как минимум, четырех планет. К этому времени эти планеты квазистабильизировались. Солнечная система тогда состояла из Солнца, планет и диска мусора из мелких планетезималей вокруг гигантов (массу этого диска авторы положили равной  $\sim(30-50)M_E$ , где  $M_E$  - масса Земли, и размерами от внутреннего края орбиты Юпитера до 30–35 а.е.) Поверхностная плотность диска падала линейно с гелиоцентрическим расстоянием. Планеты-гиганты продолжали раздвигать этот диск, либо аккрецируя планетезимали, либо выбрасывая их прочь. В течение этого процесса планеты, еще находясь в резонансах, продолжали мигрировать, изменяя угловой момент диска. В диске также продолжались и крутильные процессы. Численное интегрирование показало, что в этой ситуации Юпитер вынужден был немного вернуться внутрь, тогда как Сатурн, Уран и Нептун дрейфовали наружу. Из-за гравитационного взаимодействия гигантов с диском их эксцентриситеты и взаимные наклоны уменьшались. В результате динамического трения менялись и их орбитальные периоды. Проходя мимо гигантов, выбрасываемые ими планетезимали постепенно отбирали у них энергию орбитального движения и тем самым округляли их орбиты. В конце концов, внешние гиганты выходят (с помощью планетезималей) из тесных резонансов и за короткий по космическим масштабам срок в несколько миллионов лет система окончательно принимает современный вид. Выброшенные же планетезимали, а может быть вместе с ними и неизвестные гиганты, обретаются далеко на пределе гравитационного влияния Солнца.

Итак, вроде бы объединенная концепция «атака Юпитера», «смена галса» и модель Ниццы, объяснила все особенности Солнечной системы. Все, кроме одной – отсутствия планет внутри орбиты Меркурия.

В 2015 г. американцы К. Батыгин и Г. Лафлин [14], используя первые две составляющие объединенной концепции, провели тщательное компьютерное моделирование с привлечением аналитических выкладок для уточ-

нения начальных условий, результаты которого сравнивали по ходу работы с наблюдениями экзосистем (в основном, примером для сравнения служила система Кеплер-11). Расчеты велись, прослеживая движение Юпитера от  $a > 5a_e$  до  $a \sim 1.5a_e$ . Предполагается, что планетезимали внутреннего диска вращались по круговым орбитам. Вторгшийся Юпитер нарушил порядок, превратив диск в хаотический клубок пересекающихся траекторий, что неминуемо вело к столкновениям и к дроблению. Под действием столкновений даже при небольшой вязкости диска планетезимали быстро теряли энергию и с круговых орбит переходили на спирали, приближаясь к Солнцу.

Вычисления показали, что, даже если диск состоял из объектов разной величины (рассматривались тела размерами в 10 км, 100 км, 1000 км), они могут быть разрушены телами примерно в 10 раз меньшими. Это объясняет, почему нет близких к Солнцу планет: они все упали на Солнце по спиралям. После ухода Юпитера во внутренней части Солнечной системы осталось довольно узкое кольцо каменных обломков и льды, перетащенные Юпитером из внешнего диска. Из этого-то материала и сформировались через сотни миллионов лет планеты земной группы.

#### Литература

1. *А.М. Молчанов*, Об эволюции планетных систем, 1963, М., издательство Академии наук СССР, сб. Проблемы движения искусственных небесных тел (Доклады на Конференции по общим и прикладным вопросам теоретической астрономии), стр.42-49.
2. *Albert M. Moltchanov*, Sur l'évolution des systèmes planétaire, 1963, Springer-verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, Dynamics of satellites, symposium Paris, may 28-30, 1962, pp.40-50.
3. *E.M. Drobyshovski*, Was Jupiter the protosun's core? 1974, Nature, 250, pp. 35-36.
4. *E.M. Drobyshovski*, On the chemical composition of the Moon, Jupiter, meteorites and Am stars, 1975, Earth&Planet, Sci. Letters, 25, pp.368-378.
5. *Э.М. Дробышевский*, Сколько планет может быть в Солнечной системе, 1976, Л., Академия наук СССР, препринт №508 ЛИЯФ (ордена Ленина физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе), 11 стр.
6. *Н.Н. Козлов, Т.М. Энеев*, Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного облака, 1978, М., ордена Ленина институт прикладной математики Академии наук СССР, препринт № 134, 81 стр.
7. *Н.Н. Козлов и Т.М. Энеев*, Динамика процесса аккумуляции планет земной группы. Формирование обратного вращения Венеры, 1978, М., ордена Ленина институт прикладной математики Академии наук СССР, препринт № 135, 43 стр.
8. *Е.А. Гребеников, И.И. Смольский*. Эволюция орбиты Марса на интервале времени в сто миллионов лет, Препринт «Сообщения по прикладной математике», ВЦ РАН, 2007, 62с.
9. *E.A. Grebenikov, J.J. Smulsky*, Numerical Investigation of the Mars Orbit Evolution in the Time Interval of Hundred Million Years , "Computer Algebra Systems in Teaching and Research", - Siedlce, Poland: University of Podlasie, 2009, p.100-103.
10. *М.Я. Маров*, Планеты Солнечной системы, 1986, М., Наука, 324 стр.

11. *F. Masset and M. Snellgrove*, Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet, 2001, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, 320,pp.L.54-L.59.
12. *Kevin J. Walsh, Alessandro Morbidelli, Sean N. Raymond, David P. O'Brien & Avi M. Mandell*, A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration, 2011, *Nature*, vol 475, pp.206-209.
13. *K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli & H.F. Levison*, Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System, 2005, *Nature*,vol.435, pp. 459-461,
14. *K. Batygin and G. Laughlin*, Jupiter's Decisive Role in the Inner Solar System's Early Evolution, 2015, *ArXiv:1503.06945v2 [astro-ph.EP]*, pp.1-5.

## ***Chapter 17***

### **ON MIGRATION OF THE SOLAR SYSTEM GIANT PLANETS**

© **V.M. Chepurova**

*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia*

The paper begins with a very brief overview of the contribution of Soviet scientists in the second half of the twentieth century in the study of the dynamic evolution of the solar system.

The second part of the paper contains a brief overview of modern hypotheses of West-European and American planetologists, that intent to explain the discrepancies between the state of the Solar System and extrasolar systems on the base of Otto Schmidt theory of planet formation

## ***Раздел 4***

# **Жизнь на Земле и планетах**

*редактор М.В. Рагульская*



## **Глава 18**

### **РАННЕЕ СОЛНЦЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ЗЕМЛЕ И БИОСФЕРА**

© **М.В. Рагульская**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова, Москва, Троицк, Россия*

В статье рассматриваются вопросы о влиянии раннего Солнца и параметров солнечной системы на палеомагнитное поле и развитие жизни на Земле.

В последнее десятилетие специалисты различных научных профилей обсуждают вопрос о возможности верификации имеющихся теоретических моделей формирования Солнечной системы и физических условий на ранней Земле с точки зрения возможности существования и развития современного типа жизни.

Вопрос этот можно рассмотреть с двух сторон. Начальные физические условия на Земле накладывали ограничения на возможные варианты жизни («бытие определяет сознание»), а имеющиеся на сегодня астробиологические и палеонтологические данные о ранних экосистемах позволяют отбрасывать те физические модели, которые не соответствуют факту и условиям их экспериментально подтвержденного существования. Например, 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, исторически занимающейся этой областью знаний. И, наоборот, из нескольких моделей возможных мест и технологий первичного зарождения жизни предпочтительнее те, которые объясняют, каким образом первые организмы противостояли сверхактивному разрушающему воздействию ультрафиолетового излучения древнего Солнца.

Изучение эволюции звездных скоплений и планет, физических условий существования раннего Солнца и Земли, а также достижения астробиологии и палеонтологии привело к тому, что к настоящему моменту гипотезы возникновения жизни отличаются от тех, что были еще 30 лет назад, по многим пунктам:

1. Процессы возникновения жизни могли начинаться уже на этапе образования звездных скоплений из молекулярных облаков; экспериментальный материал по химическому составу молекулярных облаков в межзвездном пространстве предполагает существование активного добиологического синтеза сложных органических веществ;

2. Эти данные позволяют не рассматривать в качестве конкурентов гипотезу панспермии (занесения изначальных биологических структур из космоса на Землю) и гипотезу зарождения первичной жизни на Земле.

Скорее всего, эти гипотезы отражают разные этапы одного и того же процесса;

3. Земная жизнь возникала не как отдельный биологический элемент любой степени сложности (РНК, белок или ДНК), но как сложная открытая экосистема с различными взаимодополняющими компонентами (Г.А. Заварзин, теория функциональных связей в геосферно-биосферной системе).

4. Гипотеза возникновения земных экосистем в однофазной среде («первичный бульон») представляется на сегодняшний день неубедительной. Все современные модели используют либо двухфазную среду (например, модель В.А. Твердислова о возникновении жизни на границе жидкой и газообразной фазы), либо трехфазную (обогащенный микроэлементами газ, вода и твердые глиняные структуры, как например, в модели А. Мулкиджаяна).

5. «Водно-углеродный шовинизм» в качестве основной концепции существования жизни неоправданно суживает ареал обитаемости Вселенной. Биохимически земная форма жизни не является единственно возможной.

6. Современные теоретические модели древней земной биосферы учитывают системообразующую роль интенсивного ультрафиолетового и рентгеновского излучения древнего Солнца.

### **Добиологический синтез органического вещества**

Тот вариант жизни, который мы имеем на сегодняшний день, формировался и отбирался в соответствие с физическими условиями на ранней Земле 4,5–4 млрд лет назад, а возможно, еще раньше – в протозвездном или протопланетном облаке.

Образование Солнечной системы происходило в плотной звездной ассоциации, с присутствием соседних массивных звезд, с возможностью неоднократных инъекций вещества в допланетные диски благодаря вспышкам сверхновых звезд. Экспериментальный материал по химическому составу молекулярных облаков в межзвездном пространстве предполагает наличие активного добиологического синтеза сложных органических веществ уже в процессе формирования звездных скоплений (см. статью Д.В. Вибе). По современным представлениям ключевую роль в межзвездной молекулярной химии играют нейтральные ионы (или ион-молекулярные) и реакции между ионизованным и нейтральным реагентом, а первичную ионизацию обеспечивают частицы космических лучей. В межзвездном веществе присутствуют как синтез («сборка»), так и диссоциации («распад») молекул. В настоящее время количество известных межзвездных и околозвездных молекул приближается к двум сотням (без учета изомеров и изотопомеров). Среди них встречаются как простые, так и довольно сложные соединения: самые большие уверенно идентифициро-

ванные молекулы состоят из 12 атомов ( $\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5$ ,  $\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$ ). В межзвездной среде, несомненно, присутствуют и более сложные органические структуры – фуллерены, какие-то формы ароматических соединений. Обновляемый список экспериментально зафиксированных межзвездных и околозвездных молекул приведен на специализированном астрохимическом сайте <http://astrochymist.org/>. В последнее время это разнообразие все чаще становится поводом для предположения о том, что органические соединения могли попадать в «готовом виде» на Землю и на другие формирующиеся планеты.

По мнению В.Н. Снытникова, начальной массы всей Земли не хватает для создания массы первичной биосферы примерно на 6 порядков (даже в предположении использования самых эффективных многоступенчатых автокаталитических химических реакций). Первичную «лабораторию» по производству органических веществ, основанную на процессах самоорганизации, необходимо искать в молекулярных облаках, не только галактических, но и протопланетных [21]. При образовании планет в околозвездных дисках за десятки миллионов лет происходит сжатие вещества – от разреженной газопылевой среды молекулярных облаков до конденсированного состояния среды. Сжатие вещества в дисках может сопровождаться потерей водорода и гелия, как у планет земной группы Солнечной системы. В этом случае происходит обогащение среды кислородом, углеродом, азотом и другими элементами в их космической распространенности. Эти элементы вместе с водородом составляют основу органических соединений и известной нам жизни. Сжатие вещества в дисках – процесс неравновесный, который идет с широчайшей сменой условий по давлению, температуре, плотности вещества, воздействию излучения, и сопровождается разнообразным комплексом физико-химических реакций. Пылевидная твердая компонента вещества диска, состоящая в основном из Mg, Si, O, Fe с добавками всех остальных элементов, исходно находилась в нанодисперсном состоянии. Наночастицы этого состава обладают высокой каталитической активностью в химических процессах синтеза сложных органических и предбиологических соединений. Космический реактор по давлению и температуре реагентов был близок к условиям лабораторных каталитических реакторов высокого давления.

Успешная экспериментальная реализация добиологического синтеза органических веществ в присутствии метеоритов в качестве катализаторов пребиотического синтеза молекул из формамида под действием ионизирующих излучений проведена в 2016 году в ОИЯИ, г. Дубна (см. статью М.И. Капралова).

Созданные в галактических или протопланетных молекулярных облаках пробиологические структуры могли сохраняться и транспортироваться по ранней Солнечной системе (СС) до 6–10 млн лет в крупных метеоритах

с твердой внешней оболочкой и жидкой водой внутри (см. статью В.В. Бусарева).

Эти данные позволяют не рассматривать в качестве непримиримо конкурентных гипотезу панспермии (занесения изначальных биологических структур из космоса на Землю) и гипотезу зарождения первичной жизни на Земле. Скорее всего эти гипотезы отражают разные этапы одного и того же процесса. Молекулы – «кирпичики жизни» могут возникать в протопланетных дисках еще на стадии слипания пылинок и образования планетезималей. В процессе эволюции диска некоторые из этих «кирпичиков» попадают туда, где могут создаться условия подходящие для сохранения и переноса жизни (например, в рождающиеся астероиды, у которых существует фаза жидкого водяного ядра). При попадании на планету начинается новый цикл развития и адаптации жизни применительно к конкретным физическим условиям. Как показывает опыт развития Земли, иногда этот процесс бывает успешным.

### **Молодое Солнце и ранняя Земля**

Для существования любого процесса нужна энергия. У биосферы есть только два глобальных источника энергии – энергия Солнца и земных недр. Динамика молодого Солнца и физические условия на ранней Земле, безусловно, определяли формирование земной биосферы: выбраковывая, к примеру, из формирующихся молекул конфигурации, неустойчивые к ультрафиолетовому излучению.

Возраст Солнца около 4,6 млрд лет, Земля моложе Солнца на 100 млн 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). Возникновение устойчивой системы Земля–Луна определила стабильность параметров нашей планеты. На данный момент подтверждена оценка общей длительности завершающего этапа роста Земли – около 100 млн лет от начала образования из протопланетного диска. Начало развития жизни и возникновение магнитного поля на нашей планете, скорее всего, произошли одновременно, около 4–4,2 млрд лет назад.

Молодое Солнце сильно отличалось от сегодняшнего его состояния. В статьях В.А. Батурина, С.И. Аюкова и М.М. Кацовой рассматривается общая картина современных представлений о строении и эволюции как звезд солнечного типа, так и нашего светила в первые 0,5–1 млрд лет его существования. Через примерно 0,5–1 млрд лет после образования Солнца, вероятно, имело период вращения вокруг своей оси около 8–10 дней. Различные биологические виды формировались в разное астрономическое

время, поэтому в их ритмике наряду с современными периодами солнечного происхождения должны присутствовать периоды эпохи первоначального формирования вида, протяженностью от 10–14 древних суток до 26–30 современных суток дифференциального вращения Солнца вокруг своей оси (на геоэффективных широтах). При анализе динамических спектров клеточных биологических объектов необходимо уделить особое внимание периодам, более коротким, чем современные 27 суток оборота Солнца. И не пытаться «жестко привязать» эти короткие периоды к динамике современных космогеофизических факторов.

В эпоху раннего Солнца его активность была более высокой, чем сейчас, но менее упорядоченной. 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) отношение рентгеновской светимости молодого Солнца к его полной (боллометрической) светимости было в тысячи раз больше, чем в обычный максимум активности в современную эпоху. То же можно сказать и об интенсивности солнечных космических лучей.

При отсутствии атмосферы и меньших размерах магнитосферы Земли эти виды излучения были существенными поражающими факторами, препятствующими как процессам зарождения жизни на Земле, так и процессам переноса органических молекул с планеты на планету в пределах Солнечной системы.

Четыре – три с половиной миллиарда лет тому назад во вспышечной активности Солнца доминировали не импульсные явления (как в настоящее время), а более длительные события. Однако в момент крупных вспышек мощность корпускулярного излучения древнего Солнца не менее чем в 10 тыс. раз превосходила современное состояние. Ранее 4 млрд лет назад, даже при наличии благоприятных температурных, атмосферных и литосферных условий, вновь сформировавшаяся (или занесенная с метеоритами) жизнь на Земле практически сразу погибла под действием очередного импульсного потока внешнего излучения, не успев начать инициировать процесс эволюции. Вполне вероятно, что возникновение и устойчивое развитие сложной современной биосферы является следствием не только появления магнитосферы и атмосферы современного типа, но и переходом Солнца к более упорядоченному и регулярному типу активности. Даже при относительно спокойном и упорядоченном современном Солнце вклад солнечной активности в климат и развитие биосферы очень велик. Как было показано в статье Ю.А. Наговицына, использовавшего несколько математических реконструкций, он составляет в среднем  $17 + 5\%$ , причем дифференциально зависит от временных шкал: 0–25 лет – вклад солнечной активности 3–5%; 25–100 лет – вклад солнечной активности менее  $17 + 5\%$ ; 100–200 лет – вклад солнечной активности 30–40%; 350–450 лет – вклад

солнечной активности 50–70%; 1000–1500 лет – снижение до 5–10%; 2500 лет и больше – около 50%.

При наличии крайне интенсивных солнечных и галактических космических лучей еще одним защитным физическим фактором, крайне 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 у разнообразных небесных тел (включая Землю) связано, как правило, с работой механизма динамо – происходит преобразование кинетической энергии движущейся проводящей среды, находящейся в процессе сепарации тяжелых и легких фракций, в энергию магнитного поля. Результаты палеомагнитных данных позволяют утверждать, что значения геомагнитного поля (сравнимые с современными) отмечались уже от 4,2 млрд лет назад [Тардуно, 2012, 2015]. При этом имеющиеся основные теоретические модели динамо Земли постулируют, что твердое ядро Земли и композиционная конвекция, необходимые для существования магнитного поля Земли, возникли только 1–1,5 млрд лет назад. В этом состоит так называемый «геомагнитный парадокс». Пути теоретического разрешения «геомагнитного парадокса» предложены в статье С.В. Старченко. В статье Д.Д. Соколова рассматривается вопрос: почему магнитное поле есть у Земли, но его нет у Марса, Луны и Венеры? Проведенные им общие оценки показывают, что магнитное поле Земли, скорее всего, сформировалось в первые 10 млн лет ее существования. Отсутствие магнитного поля земного типа у Венеры логично связать с ее медленным вращением. Отсутствие магнитного поля у Марса и Луны обусловлено отсутствием у них конвективных проводящих оболочек; имеющиеся у планет земного типа остатки магнитного поля можно объяснить наличием таких оболочек в прошлом. На этих небесных телах в первые несколько сотен миллионов лет их существования, скорее всего, присутствовала защитная оболочка, которая способна была поддержать развитие соответствующей, присущей только им формы жизни.

### **Места и условия возникновения биосферы Земли и других планет**

Вопрос о происхождении жизни занимает одно из центральных мест не только в современных естественнонаучных исследованиях, но и в культурологических, философских и религиозных концепциях всех времен и народов. Большую часть исторического времени человечество придерживалось уверенности о множественности обитаемых миров. Эта идея доминирует в буддистском мировоззрении (вместе с идеей переселения душ в эти самые миры), в раннем христианстве, а в Талмуде так прямо указано количество этих обитаемых миров – 18 000. Греческая и европейская философия в лице Анаксимандра, Фалеса, Анаксагора, Эпикура, Лукреция Кара, Сирано де Бержерака, Фонтенеля, Гюйгенса, Вольтера, Галилея, Ло-

моносова, Канта, Лапласа, Гершеля поддерживала идею множественности обитаемых миров. Можно сказать, что эта идея получила повсеместное распространение, и ещё во времена Дарвина почти не было ученых или мыслителей, которые выступали бы против нее. Лишь отдельные голоса предостерегали против представления, что жизнь, в том числе разумная, распространена поголовно на всех планетах. Более подробно этот период описан в блистательной книге И.С. Шкловского «Вселенная, жизнь, разум». Исключений было два: католическая церковь, яростно отстаивающая богоизбранность и единственность земного человечества, и естественно-научная мысль 20 века. Джордано Бруно пошел именно за эту идею на костер инквизиции в 1600 году. Через 350 лет дровишек в его костер накидали бы уже не церковники, а ученые.

В 20 веке доминирующей парадигмой происхождения жизни на Земле становится гипотеза Опарина-Холдейна, которая предполагает возникновение жизни на поверхности Земли в первые несколько сотен миллионов лет её существования. Другая парадигма, в 20 веке связанная с именами Рихтера-Аррениуса, предполагает занесение изначальных «кирпичиков или спор жизни» на Землю из космоса. Самые последовательные сторонники панспермии считают, что жизнь как таковая является одним из фундаментальных свойств материи.

Научно обоснованный подход к этой проблеме был сформирован Вернадским, который предполагал извечность жизни в течение геологического времени. Из данных о наличии признаков жизни на Земле на всех геологических временах им был сделан вывод о необходимости поиска места возникновения жизни в особенных условиях в космосе. Возникновение жизни при формировании планет, «гипотеза астрокатализа», рассматривается в [21]. Околосредные аккреционные диски, в которых зарождаются планеты, дают те особые космические условия, на необходимость которых указывал Вернадский.

Ещё один аргумент в пользу космического происхождения жизни – хиральность земной биосферы. Для земной жизни характерна избирательная гомохиральность (выделенное направление в биологических молекулах). Правила химии и биологии не запрещают существования где-то во Вселенной жизни с другой хиральностью, построенной, как и наша на углероде, но например с L-углеводами в ДНК. Причина возникновения гомохиральности жизни на Земле до сих пор не выяснена, возможно, для её формирования нужны интенсивности излучения, существенно превышающие энергетику одной планетной системы. Недавно около массивной протозвезды в ближайшей к нам области интенсивного звездообразования – туманности Ориона – обнаружен примыкающий к нему протяженный участок неба размером  $0.4 \text{ пк} = 1.2 \text{ св. года}$ . Идущее оттуда излучение имеет значительную круговую поляризацию в инфракрасном диапазоне (2 мкм), достигающую ~10%. Изотопный состав СС говорит о том, что на раннем

этапе ее формирования рядом произошел взрыв массивной сверхновой. Если эта протозвезда испускала свет со степенью круговой поляризации, характерной для протозвезды BN/KL, то подвергнутый такому облучению рацемический набор молекул протопланетного диска приобретает преимущественную хиральность. Последующие химические реакции могли усилить ее, в том числе в условиях протопланетного диска.

А.Ю. Розанов также считает, что жизнь – это явление галактических масштабов, и время ее зарождения следует передвинуть на более раннее время относительно существующих датировок. В его статье проводится верификация физических условий на ранней Земле последними астробиологическими и палеонтологическими данными. В частности, показано, что оптимальные температурные кривые для древних бактерий предполагают среднюю температуру океана не менее  $+40^{\circ}\text{C}$  (сегодня это  $+15^{\circ}\text{C}$ ), что ставит под сомнение гипотезу «Земля – снежок» в первые 500–700 млн лет существования нашей планеты. Также благодаря исследованиям последних двух десятилетий по палеонтологии докембрия и бактериальной палеонтологии отвергается гипотеза о бескислородной атмосфере Земли в первые 2 млрд лет её геологически документированной истории (4,0–0 Ga). Сравнение окаменелостей из метеоритов и современных биологических форм показывает их идентичность. Также А.Ю. Розановым высказывается гипотеза о необходимости рассмотрения возможного существования мира прокариотов (4,5–5 млрд лет назад) и мира РНК (до 7 млрд лет назад).

В статье В.А. Твердислова приведены противоположные аргументы, а именно: что на ранней Земле были все условия для локального зарождения жизни на поверхности первичных водных сред (около 4 млрд лет назад). Однако первичными в происхождении жизни являются не химические (или биологические) закономерности, а физические принципы симметрии и хиральности.

Представления о симметрии и ее нарушениях составляют фундаментальную основу физики. Столь же важными они должны быть для понимания физических основ происхождения и эволюции живых систем. Исходная удаленность биологических структур от состояния термодинамического равновесия связана со спонтанным возникновением в неравновесном тонком поверхностном слое морской воды двух сопряженных фундаментальных биологических асимметрий: клеточной – ионной и молекулярной – хиральной. Первая определила способность дискретных пробионтов к реагированию на внешние возмущения и их включение в биологическую эволюцию, вторая – молекулярную специфичность углеродных соединений и их иерархическое структурообразование.

В процессе экспериментов по искусственному созданию сложных нуклеотидов выяснилось, что для сдвига равновесия в сторону преимущественного создания, а не распада молекул, необходимо введение в модели сосуществующих неравновесных двухфазных водно-газообразных или

трехфазных структур (т.е. гипотеза монофазного первичного бульона оказывается несостоятельной). В настоящее время биологи довольно далеко продвинулись в искусственном синтезе РНК из нуклеатидов, однако для этого процесса плохо подходит монофазная водная среда. Из-за того, что во время реакции синтеза выделяется вода, химическое равновесие в таких средах будет сдвинуто в сторону распада длинных полимерных молекул, а не в сторону их «сборки». Для сдвига равновесия в сторону преимущественного создания, а не распада молекул, необходимо введение в модели сосуществующих неравновесных двухфазных водно-газообразных или трехфазных структур. В качестве места возникновения первых биологических объектов в современных моделях обычно рассматривают адсорбирующие поверхности различных глин (например, в работах А.Б. Четверина, Институт белка РАН), взаимодействующих с водными растворами и обогащенными другими химическими элементами газами. Одновременно глиняная (или сульфидная минеральная) подложка играет роль формирующей подложки, на которой происходит сборка длинных органических молекул, границы раздела термодинамически неравновесных структур и катализатора реакции.

В ходе дискуссии на коллоквиуме обсуждалось, являются ли углерод и вода единственными возможными кирпичиками «основ жизни» («водно-углеродный шовинизм») или возможно построение жизни на основе другой биохимии?

В качестве «заместителей углерода» были предложены кремний, азот и бор. При этом отмечена уникальность углерода: кремний не создает двойных связей, биохимия азота требует сверхвысоких давлений, а бор является слишком редким элементом во Вселенной. Было отмечено, что подробно этот вопрос освещен в книге М.А. Никитина «Происхождение жизни: от туманности до клетки». По мнению автора, альтернативную биохимию можно предложить, если заменить воду на другие растворители: например, на аммиак, серную кислоту, формамид или на жидкую углекислоту. Такие условия могут присутствовать на спутниках планет-гигантов (на Европе, Ганимеде, Титане) или на экзопланетах. Еще 20–30 лет назад за идею существования биосфер на краю Солнечной системы подняли бы на смех, а сейчас специалисты всерьез ищут там жизнь (см. статьи М.Б. Симакова и В.И. Шематовича).

Гипотетический внутренний океан Титана или Европы может содержать несколько ниш, пригодных для возникновения и существования биологических систем:

- слой жидкой воды, который содержит разнообразные органические и неорганические составляющие;
- поры (каналы) различных размеров и полости с жидкой водой в нижнем слое ледяной коры;

- места криогенной активности на поверхности спутника, где внутренний водный слой реагирует с продуктами сложной атмосферной фотохимии (в случае Титана);

- разветвленную сеть пещер и других образований, которая может быть связана как с криогенным вулканизмом, так и с воздействием приливных сил;

- места падений метеоритов, в которых могут образовываться значительные массивы жидкой воды, сохраняющиеся продолжительное время, до нескольких миллионов лет;

- места гидротермальной активности на дне океана.

Подобные внутренние океаны могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах, что повышает интерес к исследованиям экзопланет.

Экзотический вариант возможного существования квази- периодической биосферы Марса предложен в статье А.К. Павлова. На современном Марсе могут быть районы с сезонной биологической активностью, где реализуются условия появления жидких растворов в поверхностном слое грунта. Существующие модели колебаний климата на Марсе за счет осцилляций наклона оси вращения предсказывают сильные колебания температуры и атмосферного давления с основным периодом 120 000 лет. Анализ воздействия низкого атмосферного давления и температуры, а также высокого радиационного фона от космических лучей на «выживаемость» бактерий и возможность их активного метаболизма показал, что эти факторы не являются «стерилизующими». Как показали эксперименты на ускорителе в Дубне, сообщества из различных видов бактерий выдерживают в 10–12 раз более интенсивное облучение, чем каждый из видов в отдельности (подробно в статье В.С. Чепцова).

Полученные результаты значительно расширяют существующие представления о радиорезистентности земных микроорганизмов, что дает основания для пересмотра существующих оценок вероятности и длительности сохранения живых организмов на планетах и телах Солнечной системы. Предполагается возможность сохранения потенциальной биосферы в приповерхностном (защищенном от УФ-излучения) слое реголита Марса в латентном состоянии в течение не менее 13 млн лет, при современной интенсивности ионизирующего излучения. Т.е. предложенная А.К. Павловым схема существования квази- периодической марсианской биосферы, которая находится 120 000 лет в латентном состоянии, и лишь несколько дней – в активном, с 10-кратным запасом перекрывает 10–13 млн. лет, отпущенных по прочности даже для земных бактериальных сообществ, не приспособленных специально под тяжелые марсианские условия. Возможные места существования на красной планете древних и современных марсианских экологических сообществ также обсуждаются в статье Н.Э. Демидова.

Оба автора сходятся во мнении, что уже в ближайшее десятилетие технически возможно обнаружение биомаркеров новыми марсианскими космическими миссиями. Разнятся только места возможного забора грунта. Предпочтение отдается местам с относительно недавней биологической активностью, включая районы с сезонной эмиссией метана, или породах, недавно выброшенных на поверхность с глубины в несколько метров (вещество «молодых» кратеров).

### **Адаптационные стратегии древних и современных биологических структур**

Многие эволюционные вехи в развитии биосферы имеют не биологическую, а физическую природу. Например, возникновение многоклеточных организмов, а также топологически «более плотно упакованных» скрученных форм белков позволяет биообъектам успешнее противостоять разрушительному внешнему излучению даже при разрушении части структуры. Формирующиеся биологические структуры и экологические системы должны были одновременно «уметь использовать» ультрафиолетовое излучение в качестве источника энергии, эффективно от него защищаться и проходить отбор на устойчивость к разрушительному воздействию излучения молодого Солнца. Фактор наличия мощного солнечного УФ-излучения (при отсутствии защитной атмосферы современного типа) и потоки космических лучей, приходящие на молодую Землю без защиты современной магнитосферы и озоносферы, скорее всего, определяли место и условия возникновения развитой земной биосферы. Благодаря мощному УФ-излучению раннего Солнца в формирующейся биосфере одновременно происходили разные типы отбора:

- отбор стойких к УФ-излучению азотистых оснований;
- отбор нуклеотидов в комплиментарные пары;
- отбор более длинных и устойчивых молекул РНК;
- отбор гомохиральных нуклеотидов (смесь изомеров менее устойчива к УФ-излучению, чем изомеры с одинаковой хиральностью).

В результате существующие молекулы ДНК являются максимально устойчивыми структурами к УФ-излучению, хотя не являются единственно возможными. Движение от физики к биологии, т.е. рассмотрение эволюционных процессов с учетом новых данных об активности древнего Солнца, увеличивает на несколько порядков интервал интенсивности внешнего излучения, необходимого для возникновения воспроизводимого эволюционного переструктурирования древних пробиотиков на клеточном уровне.

Из последних моделей земной биосферы хотелось бы обратить внимание читателей на так называемую модель «цинкового мира» А. Мулкиджаняна, в которой удачно рассматриваются биохимические аспекты формирования первых клеток и экологических систем в соответствии с физи-

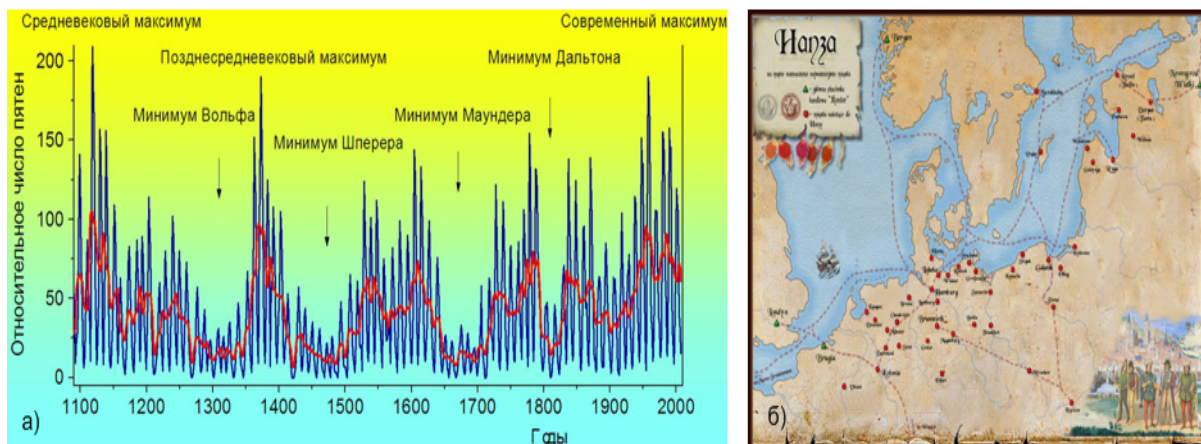
ческими условиями на ранней Земле и повышенной активностью молодого Солнца [10].

Модель рассматривает возникновение первых земных экологических сообществ в наземных геотермальных полях древней Земли с использованием УФ-излучения в качестве источника энергии, катализатора и фактора отбора первых биологических структур. В образовании биоструктур участвуют обогащенный вулканический пар (с соотношением калия и натрия, соответствующего цитоплазме современных клеток), геотермальная вода с хлоридами натрия и железа и пористые минеральные твердые осадки в качестве катализатора и основной матрицы; присутствуют также фосфор, азот, цинк, марганец, молибден и бор, а сульфид цинка выполняет функцию защитной пленки от излишнего УФ-излучения древнего Солнца, что приводит к сосуществованию нескольких разных механизмов получения органических веществ из атмосферного углекислого газа и азота. Такой процесс позволяет создавать не отдельные биоэлементы, а целые экологические колонии первой земной биосферы в грязевых котлах древних вулканических геотермальных полей.

Еще одна успешная адаптационная «стратегия» древних биологических структур в условиях импульсного агрессивного Солнца – это способность создавать конгломераты из различных видов биообъектов. Сообщества из различных видов бактерий выдерживают в 10–12 раз более интенсивное облучение, чем каждый из видов в отдельности. Первые земные биологические объекты вынуждены были приспособляться к жизни в условиях повышенного импульсного излучения молодого Солнца, а для этого пришлось «сбиваться в кучу» и образовывать структурированный кластер (что повышало шансы для бактерий из центра такого образования остаться не поврежденными при проникающем внешнем излучении, а также стимулировало возникновение дифференцирования функций и возникновения эукариотов). Такие кластеры послужили прообразами клеток. По-видимому, способность белков к плотно упакованному свертыванию имеет ту же физическую природу противодействия повреждающему внешнему излучению. До сих пор в нашей крови после рентгеновских вспышек на Солнце красные кровяные тельца слипаются в кучу, повышая тем самым свертываемость крови и увеличивая для организма шанс на выживание [6]. Третьей защитной адаптационной стратегией к проникающему внешнему излучению было существование жизни под прикрытием толщи воды или каменных земных пород. Водное бытие продолжалось до момента, когда Солнце перешло в современный более упорядоченный и периодичный тип активности, а Земля обзавелась всеми современными защитными оболочками, включая озоносферу.

Сохранность древних адаптивных функций до наших дней можно объяснить необходимостью самозащиты биосферы в моменты экскурсов и инверсий магнитного поля Земли, когда магнитосфера уменьшается и ме-

няет конфигурацию, и на поверхности планеты резко повышается уровень губительных для клеток энергичных космических лучей и вызванного ими вторичного излучения. В настоящее время подстройка ритмов живых систем наблюдается на всех уровнях организации биосферы [3–7, 14, 15]. Изменения динамики солнечной активности (СА) оказывает влияние на климатические и биосферные процессы как в краткосрочном, так и в долгосрочном масштабе. Так за последние 1000 лет наблюдались существенные колебания СА, периоды повышенной активности сменялись периодами практически полного ее исчезновения (рис. 1). Периоды высокой активности обычно сопровождаются засухами и повышенными температурами (например, потепление 12–13 веков, формирование и расцвет северного торгового сообщества – Ганзейской Лиги на Балтике и в Северном море), периоды низкой активности – понижением температуры и длительными снежными зимами.

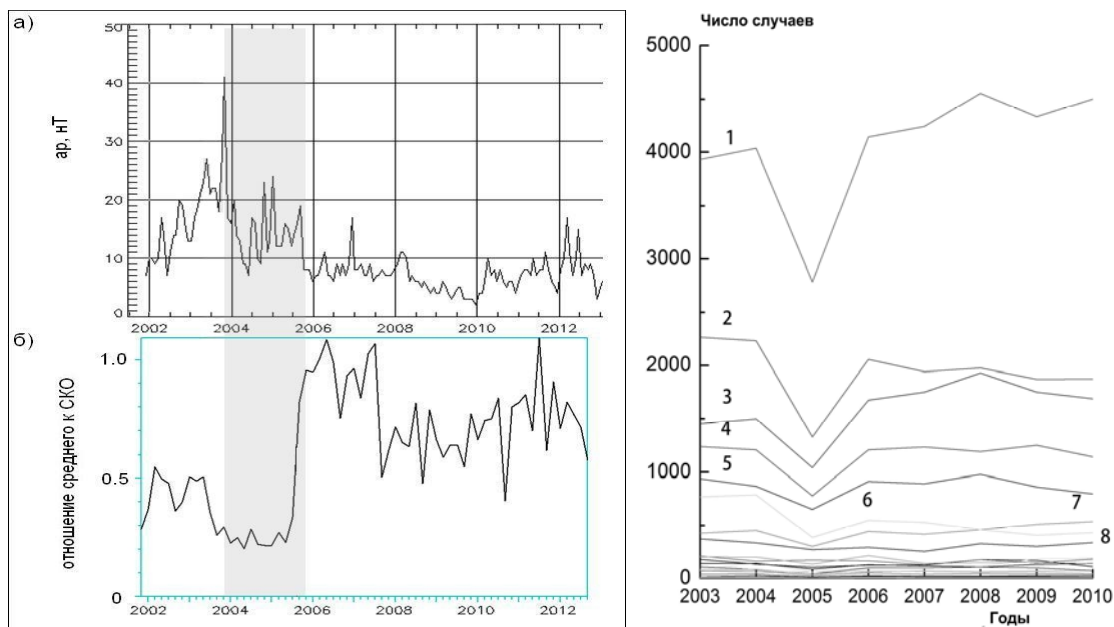


**Рис. 1.** *а)* Динамика солнечной активности на 1000-летней шкале (Ю.А. Наговицын, 1997). *б)* Карта торговых связей Ганзейской лиги (<http://www.senat.org/Germany/Integra-14.html>)

Как видно из рисунка 1а, с 1840 годов человечество живет в периоде повышенной солнечной активности. Все достижения современной медицины эффективны именно в этих условиях интенсивных солнечных космических лучей и вспышечных процессов, когда они разрабатывались и тестировались. Насколько будет эффективна «постиндустриальная медицина высоких циклов» во время низких эпох, сходных с Маундеровским минимумом, мы не знаем.

Однако последние гелиогеофизические данные и данные длительных биомедицинских мониторингов позволяют предположить наступление длительного периода низкой солнечной активности, вплоть до 2060-х годов. В 2004–2006 годах произошла перестройка солнечно-земных связей, которая затронула целый комплекс факторов: динамику магнитных полей Солнца, параметров космической погоды и солнечного ветра, а также характер геомагнитной активности [13, 15]. Например, в 2004–2005 годах

изменилось соотношение количества геомагнитных бурь с внезапным и постепенным началом. До 2003 года развитие цикла было достаточно традиционным, и к 2005 году ожидался минимум числа солнечных пятен. Однако затем с 2005 года началось то, что принято называть «затяжным минимумом». Число пятен медленно убывало, но резко исчезли и другие источники геомагнитных возмущений (корональные дыры и корональные выбросы). Все это привело к резкому спаду интенсивности геомагнитного поля в 2004–2006 годах. В течение 2003–2004 годов произошли существенные изменения динамики ар-индекса геомагнитной активности, и уменьшение ее амплитуды после середины 2005 года до значений, в последний раз наблюдавшихся в 1965–1966 годах. Средние значения ар-индекса до и после выделенного периода равны, соответственно, 13.1 нТ и 7 нТ.

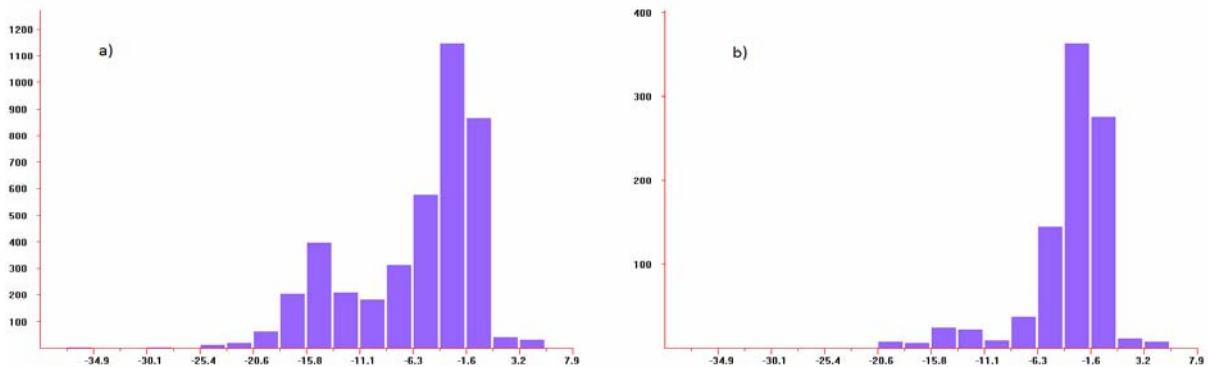


**Рис. 2.** *а)* ар-индекс геомагнитной активности за период 2002–2012 гг. (серым цветом выделен период перестройки солнечно-земных связей); *б)* отношение среднего по группе значения проводимости выделенных участков кожи к среднеквадратичному отклонению этого параметра за 2002–2012 годы (серым цветом выделен период перестройки солнечно-земных связей); *в)* График смертности по Республике Саха (Якутия) за 2003–2010 гг. Цифрами показаны причины смерти: 1 – болезни сосудов; 2 – травмы, обморожения, ожоги; все несчастные случаи; 3 – заболевания сердца и сосудов; 4 – злокачественные образования; 5 – нарушения мозгового кровотока; 6 – внезапная смерть; 7 – болезни органов пищеварения; 8 – заболевания органов дыхания. (График предоставлен С.Н. Самсоновым, Якутск.)

С началом 24 цикла в 2008–2009 годах странности не исчезли. Текущий цикл солнечной активности остался невысоким, но даже для такого невысокого цикла количество нестационарных явлений непропорционально мало. Одновременно с изменениями в космической погоде произошли и

существенные изменения в адаптационных технологиях живых систем, зафиксированные в длительных мониторинговых экспериментах и данных медицинской статистики (рисунок 2).

Регуляторные механизмы биосферы откликаются как на высокие, так и на низкие периоды СА, меняется только удельный вклад основных действующих факторов космической погоды [15]. Так в максимуме солнечной активности существенным оказывается вклад вариаций геомагнитного поля, а в минимуме на роль основного регуляторного биотропного фактора претендуют галактические космические лучи. Гистограммы распределения интенсивности ГКЛ и гистограммы распределения по дням эффекта окрашивания (метахромазии) в колонии эталонных дрожжей за 2000–2012 год приведены на рисунке 3. Мониторинговые данные по метахромазии представлены Е. Н. Громозовой (институт микробиологии НАНУ, Киев), статистическая обработка произведена Е. А. Руденчиком (ИЗМИРАН, Москва).



**Рис. 3.** *а)* По оси ординат – количество дней заданного интервала интенсивности ГКЛ за наблюдаемый период 2000–2012 года. Включены только дни, когда проводились эксперименты на колонии эталонных клеточных структур по метахромазии (изменение окраски) [15]. *б)* По оси ординат – количество дней заданного интервала интенсивности ГКЛ, в которые в клеточных колониях наблюдалась метахромазия 3-го типа.

Как уже обсуждалось, вклад СА в климат Земли составляет от 5–10% на временной шкале 5–15 лет до 50–70% на временной шкале от 200 до 1000 лет. Разброс достаточно широк. И если 50–70% вклада – это признание за солнечной активностью роли основного биотропного фактора внешней среды, то насколько существенен вклад в 5–10%? Из биологии известно, что потомки особей с 5% полезной мутацией уже через 200 поколений составляют почти 100% популяции. Отбраковка из процессов дальнейшей передачи генов потомков особей, не умеющих подстраиваться под более значимые, например, 30% внешние факторы, происходит еще быстрее. Поскольку история даже самых крупных биосферных видов насчитывает существенно больше 200 поколений, все биологические особи в процессе эволюции в той или иной степени приобрели свойства опере-

жающей подстройки под возможные длительные периоды повышенной или пониженной солнечной активности.

Таким образом, для выживания отдельной особи или вида необходима подстройка к текущему состоянию солнечной активности с периодами от секунд и суток до десятилетий. Для выживания биосферы в целом важно сохранение программ защиты и подстройки на более длительных временных масштабах: 1) к сильному УФ-излучению, рентгену и солнечным космическим лучам во время периодов повышения или понижения солнечной активности (характерное время – несколько раз за тысячелетие); 2) к инверсиям магнитного поля Земли (характерное время – несколько раз за миллион лет).

Также требуется сохранение программ адаптации к повышению уровня галактических космических лучей при прохождении Солнечной системой плотных рукавов Галактики (несколько раз за миллиард лет).

### **Заключение**

Итак, в настоящее время места поисков жизни (в её бактериальной форме) значительно расширились. Колыбелью жизни могут быть как молекулярные галактические облака и протопланетные диски, так и вулканы и океаны Земли, Марса и малых планет – спутников планет-гигантов, а также экзопланеты. Изменилось понятие «зоны обитаемости». Теперь в неё не входит в качестве обязательного условия наличие жидкой воды на поверхности планеты.

Эволюционно жизнеспособным является не возникновение отдельных биологических молекул, а возникновение комплексной взаимодополнительной экологической системы на границе трех фаз вещества (жидкой, твердой и газообразной). Теоретические модели древней земной биосферы учитывают системообразующую роль интенсивного ультрафиолетового и рентгеновского излучения древнего Солнца. Сохранность древних адаптивных функций биосистем до наших дней можно объяснить необходимостью самозащиты биосферы во время длительных максимумов или минимумов солнечной активности, в моменты экскурсов и инверсий магнитного поля Земли, а также во время прохождения Солнечной системой плотных рукавов Галактики.

Земная форма жизни не является единственной биохимически возможной. В качестве растворителя вместо воды альтернативные биологические структуры могли бы использовать аммиак, серную кислоту, формамид или жидкую угольную кислоту. В связи с этим встает вопрос: сможет ли человечество идентифицировать такую жизнь как жизнь, если случайно найдет её в своих космических миссиях?

## Литература

1. *Вибе Д.З., Кочина О.В., Каленский С.В., Васюнин А.И.* Моделирование образования сложных молекул в протозвездных объектах // *Астрон. журн.*, т. 90, 892, 2013.
2. Гурфинкель Ю.И. Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность. – М.: Эльф-3, 2004 (ПИК ВИНТИ). – 168
3. Коллективная монография «Биотропное воздействие космической погоды» под редакцией *Рагульской М.В.* (2010) // СПб, Изд-во ВВМ, 2010, 330 с.
4. *М. Никитин.* Происхождение жизни: от туманности до клетки. – Из-во АНФ, 2016.
5. *Чибисов С.М., Катинас Г.С., Рагульская М.В.* Биоритмы и космос: мониторинг космобиосферных связей. – М., 2013.
6. Belisheva N.K. et al, 2012, [www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012](http://www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012)
7. *Belisheva N.K., Lammer H., Biernat H.K., Vashenyuk V.E.* The effects of cosmic rays on biological systems – an investigation during GLE events // *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 8, 7–17, 2012 [www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012](http://www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012)
8. *Brack A., G. Horneck, C.S. Cockell, A. Bércecs, N.K. Belisheva, Carlos Eiroa, Thomas Henning, Tom Herbst, Lisa Kaltenegger, Alain Léger, Réne Liseau, Helmut Lammer, Franck Selsis, Charles Beichman, William Danchi, Malcolm Fridlund, Jonathan Lunine, Francesco Paresce, Alan Penny, Andreas Quirrenbach, Huub Röttgering, Jean Schneider, Daphne Stam, Giovanna Tinetti, Glenn J. White.* Origin and Evolution of Life on Terrestrial Planets // *Astrobiology*. January/February 2010, 10(1): 69-76.
9. *Gromozova E., Voychuk S., Grigoriev P. et al.* // *Sun and Geosphere*. 2012. Vol. 7, N 1. P. 117-120.
10. *Mulkiđjan A.Y. Galperin M.Y.* *Biology direct*, 2009, v. 4, p. 27
11. *Nagovitsyn Yu.A.* A nonlinear mathematical model for the Solar cyclicity and prospects for reconstructing the Solar activity in the Past // *Astronomy Letters*. Vol. 23. No. 6. PP.742-748. 1997.
12. *Nagovitsyn, Yu.A.* Global solar activity on long time scales // *Astrophysical Bulletin*, 2008, Vol. 63, Issue 1, pp. 43-55.
13. *Obridko V.N., E.V. Ivanov, A. Özgüç, A. Kilcik, V.B. Yurchyshyn,* *Solar Physics* // *Solar Phys* (2012) 281:779–792
14. *Obridko V., Ragul'skaya M., Rudenchik E., Khabarova O., Hramova E.* Solar activity 23-24 cycles and structure of biomedical monitoring data, *Tekhnologii zhivikh sistem* (Technologies of live systems, ISSN 2070-0997), 2014, 11(3), 12-22, DOI: 10.13140/2.1.2980.4167
15. *Ragul'skaya M., Rudenchik E., Chibisov S., Gromozova E.* // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, June 2015, Volume 159, Issue 2, pp. 269-272 (<http://link.springer.com/article/10.1007/s10517-015-2939-0> )
16. *Reshetnyak M., Hejda P.* Heat flux modulation in Domino dynamo model // *Open Journal of Geology*. V. 3. № 2B. P. 55-59. 2013.
17. *Svensmark H.* Evidence of nearby supernovae affecting life on Earth. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 423, Issue 2, pages 1234–1253, 2012 [ftp://ftp2.space.dtu.dk/pub/Svensmark/MNRAS\\_Svensmark2012.pdf](ftp://ftp2.space.dtu.dk/pub/Svensmark/MNRAS_Svensmark2012.pdf)
18. *Tarduno J.A., Cottrell R.D., Watkeys M.K., Bauch D.* Geomagnetic field strength 3.2 billion years ago recorded by single silicate crystals // *Nature*. V. 446. P. 657–660. 2007.
19. *Tarduno J.A., Cottrell R.D., Watkeys M.K., Hofmann A., Doubrovine P.V., Mamajek E.E., Liu D., Sibeck D.G., Neukirch L.P., Usui Y.* Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago // *Science*. V. 327. P. 1238–1240. 2010.
20. *Veizer J., Ala D., Azmy K., et al.* (1999) 87Sr/86Sr, d13C and d18O evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology* 161, 59-88

21. *Snytnikov V.N.* Astrocatalysis – Abiogenic Synthesis and Chemical Evolution at Pregeological Stages of the Earth's Formation. *Paleontological Journal*, 2010, Vol. 44, p. 761.
22. *И.С. Шкловский.* Вселенная, жизнь, разум. – М.: Наука, 1987. 6-е изд., доп. Под ред. *Н.С. Кардашева и В.И. Мороза* – 320 с.

### ***Chapter 18***

## **EARLY SUN, EARTH PHYSICAL CONDITIONS AND THE BIOSPHERE**

**© M.V. Ragulskaya**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
Moscow, Troitsk, Russia*

The report raises questions about the influence of the early sun and the solar system parameters on the paleomagnetic field and the development of life on Earth.

*Глава 19*

**ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИЕ СИНТЕЗЫ  
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ  
В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ**

© **В.Н. Снытников**

*Новосибирский государственный университет*

*Новосибирск, Россия*

Самоорганизация многокомпонентной гравитирующей среды около молодых звезд ведет за несколько миллионов лет к зарождению жизни в газопылевом околозвездном диске. Около раннего Солнца жизнь пришла к одному из своих видов – земной биосфере. Следуя основным положениям естествознания и результатам теории самоорганизации, жизнь возникает в несколько главных этапов. Сегодня из них можно указать «Холодную предысторию жизни», «Допланетный хемоценоз», «Мир РНК», «Допланетную биосферу», «Деструктивную биосферу», «Планету бактерий».

Происхождение жизни занимает одно из центральных мест в современных естественнонаучных исследованиях. За последние сто с лишним лет в этих исследованиях были выработаны две основные парадигмы происхождения жизни на Земле. Одна из них, связанная с именами Опарина-Холдейна, предполагает возникновение жизни на поверхности Земли в ее первые, геологически недокументированные 600–800 миллионов лет. Другая парадигма, связанная с именами Рихтера-Аррениуса, предполагает занесение жизни на Землю из космоса. Исходя из существования жизни на Земле во все геологические времена, В.И. Вернадский сделал вывод о возникновении жизни в космосе в особых условиях [1]. В распоряжении исследователей имеются образцы вещества Солнечной системы, возраст которых превышает земное геологическое время. Это метеориты класса углистых хондритов. Их возраст совпадает с возрастом Солнечной системы в 4,56 миллиарда лет. Многочисленные исследования этих метеоритов показывают наличие в них микрофоссилий бактериального типа [2]. Тем самым, жизнь в Солнечной системе была уже в первые десятки миллионов лет, когда шло формирование планет, метеоритов, комет и других тел.

Из факта наличия жизни на самых ранних временах формирования Солнечной системы следуют две возможности: либо жизнь была занесена извне в молекулярное облако, в котором зародилось Солнце, либо жизнь возникла непосредственно при формировании Солнечной системы. Гипотеза занесения жизни извне в Солнечную систему порождает много сложных вопросов. В частности, как она переносится в галактике в межзвездном пространстве? Как перенос жизни встроен в галактический круговорот вещества звезды – молекулярные облака – звезды? Насколько устойчивы формы жизни при длительном воздействии высокоэнергетических частиц

космических лучей? Сколько необходимо перенести организмов для заселения новой планетной системы? Сколько видов организмов должно находиться в переносимом биоценозе для его дальнейшего развития? Каков должен быть засеваемый субстрат по химическому составу и физическим условиям? В какие этапы формирования планетных систем возможен посев жизни? Большинство из этих и многих других вопросов требуют наблюдательных и экспериментальных ответов, без которых данная гипотеза носит лишь умозрительный характер. Более того, гипотеза ПЕРЕНОСА жизни не снимает вопросов где, как, когда, в каких условиях ВОЗНИКАЕТ жизнь.

Ранее автором была рассмотрена другая возможность – возникновение жизни непосредственно при формировании планет. Эта идея получила название «гипотеза астрокатализа» [3]. Околосветные аккреционные диски, в которых зарождаются планеты, дают те особые космические условия, на необходимость которых указывал В.И. Вернадский. Их изучение было начато в астрофизике относительно недавно, с середины 20-го столетия, а первые наблюдения дисков в оптическом диапазоне были сделаны телескопом Хаббл в 90-х годах [4] почти одновременно с обнаружением первой экзопланеты около звезды, подобной Солнцу [5]. Сегодня изучение дисков стало одним из передних фронтов науки [6–11]. В околосветных дисках за десятки миллионов лет при формировании планет происходит сжатие вещества от разреженной газопылевой среды молекулярных облаков до конденсированного состояния среды у космических тел. Динамика вещества в диске сопровождается потерей основных компонентов среды – водорода и гелия. В этом процессе произошло обогащение околосветной восстановительной среды кислородом, углеродом, азотом и другими элементами относительно их распространенности на Солнце. Эти элементы вместе с водородом составляют основу органических соединений и известной нам жизни. Сжатие газопылевой среды в околосветных дисках идет с широчайшей сменой условий по давлению, температуре, плотности вещества, воздействию излучения. Само сжатие сопровождается таким комплексом разнообразных физико-химических процессов, аналоги которому трудно подыскать в других природных явлениях. Общая масса органических соединений [12], участвующих при образовании планет земной группы, на много порядков превышала их содержание на современном этапе существования этих планет. Пылевидная твердая компонента вещества диска, состоящая в основном из Mg, Si, O, Fe с добавками всех остальных элементов по их космической распространенности, в исходном молекулярном облаке пребывала в нанодисперсном состоянии [13]. Для наночастиц подобных составов с железом и другими переходными металлами хорошо известна их высокая каталитическая активность в многочисленных химических процессах. Среди этих процессов можно указать синтеза простых, но индустриально важных соединений – аммиака, метанола,

формальдегида и других веществ, исходных для современной органической химии. Указанные составы твердой компоненты также используются при создании катализаторов для синтезов многих сложных органических и предбиологических соединений. Упомянутые соединения, вода и многие другие молекулы в больших объемах обнаружены в космосе в зонах образования звезд. Исходя из этих предпосылок и совокупности основных естественнонаучных данных, была выдвинута гипотеза астрокатализа [14]. По этой гипотезе зарождение жизни рассматривается как процесс самоорганизации, место и время которого следует искать на фоне процесса формирования планет.

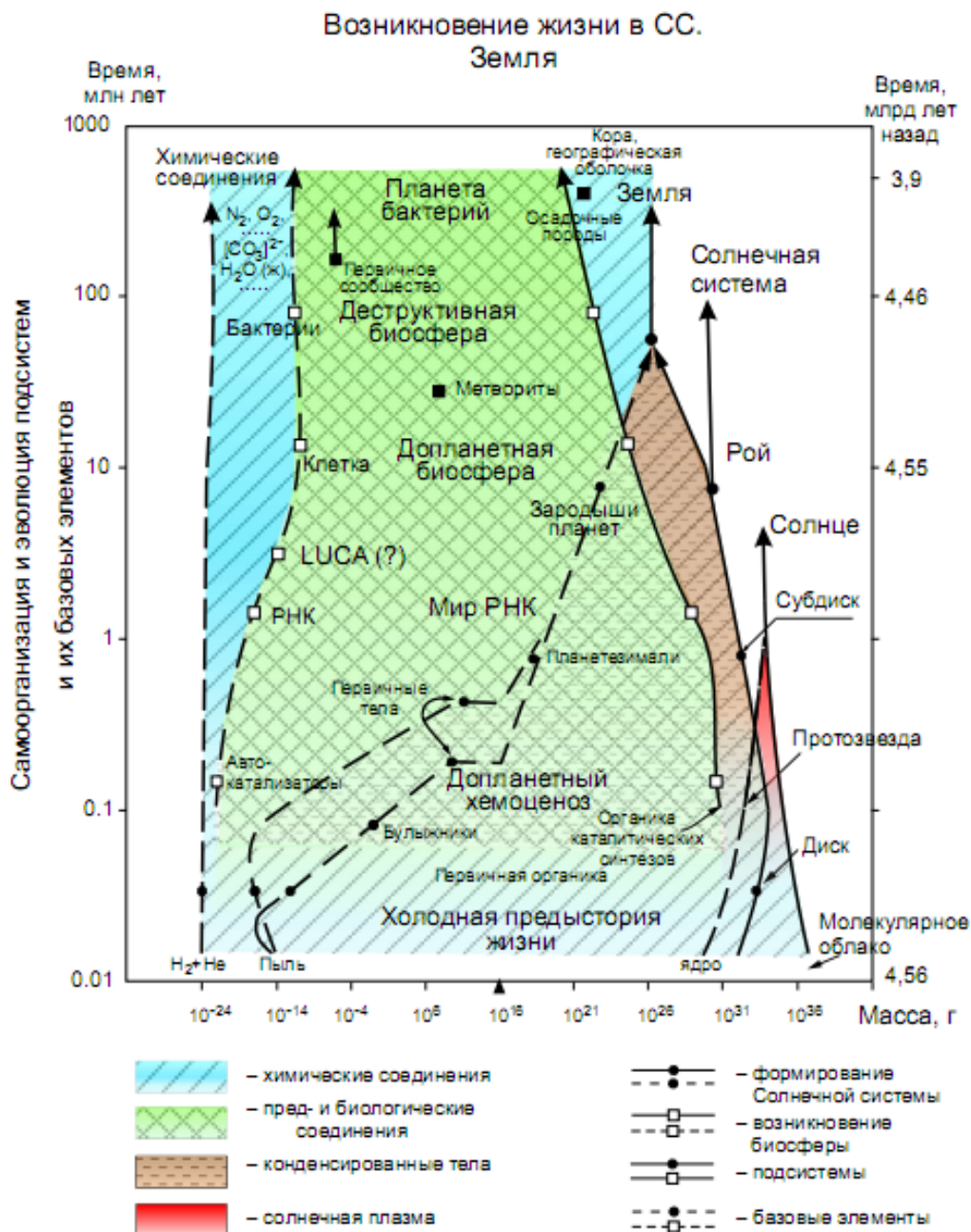
Теория самоорганизации для ряда физико-химических процессов развития многими исследователями [15]. Примером самоорганизации в химии является знаменитая реакция Белоусова-Жаботинского. В биологии самоорганизация связана с проблемой возникновения нового вида при изменяющихся условиях в среде. Возникновение жизни представляет собой процесс самоорганизации в природных условиях с химического уровня на биологический уровень. Сложность этой проблемы, как показал Г.А. Заварзин [16, 17], состоит не только в воспроизведении в лаборатории синтеза самых сложных биологических молекул или даже отдельного организма (клетки). Основная сложность проблемы лежит в необходимости объяснения одновременного возникновения всего первичного сообщества (биоценоза) из нескольких видов бактерий – продуцентов и редукторов. На Земле сохранился и далее усложнился (эволюционировал) биологический уровень самоорганизации. Но это не означает, что самоорганизация с химического на биологический уровень проходила на Земле. Совсем не обязательно, чтобы возникновение жизни проходило в один, а не в несколько этапов самоорганизации. В основе гипотезы астрокатализа о возникновении жизни в околозвездных дисках при физико-химических процессах формирования планет лежат представления о нескольких этапах физико-химической самоорганизации. Эти этапы должны встраиваться в предыдущее состояние природной системы при физико-химической самоорганизации, аналогично усложнению биоценоза [3, 18]. При этом рассматривается сбалансированная по всем законам сохранения система протозвезда – околозвездный диск – космос. Эта система близка по термодинамической организации к системе Солнце (звезда) – Земля (планета) – космос с их тремя температурами излучения. Земля (планета) имеет промежуточную между Солнцем и космосом температуру. В этой открытой по энергии термодинамической системе Земля (планета) непрерывно экспортирует вовне энтропию [15]. На величину этой энтропии на Земле идут необратимые процессы и возможно протекание неравновесных процессов самоорганизации.

Каждая природная система (основной объект) в своем текущем состоянии (очередном этапе развития) характеризуется своим базовым элемен-

том. К примеру, это бактериальное сообщество (биоценоз) и его отдельный организм (клетка). Другой пример – химический реактор с его потоками реакционных масс и отдельное химическое соединение в нем. Изменения при возникновении нового состояния в процессе самоорганизации идут как в самих объектах, так и в их базовых элементах. Поэтому для изучения самоорганизации методически важно отслеживать эти изменения и в объектах, и в базовых элементах. Заметим, что новый объект, возникающий при самоорганизации, обычно составляет доли или единицы процента по массе от исходной системы. Базовый элемент при этом может увеличиваться по массе во много раз.

Следуя этим подходам, жизнь в Солнечной системе возникает в несколько главных этапов в околозвездном диске, а далее она приобретает свой вид на формирующейся Земле. Из главных этапов происхождения жизни на Земле (основные состояния, в которых происходит самоорганизация), сегодня можно указать «Холодную предысторию жизни» [19], «Допланетный хемоценоз», «Мир РНК» [20], «Допланетную биосферу», «Деструктивную биосферу», «Планету бактерий» [21] – рисунок 1. На этом рисунке представлено возникновение жизни на Земле в Солнечной системе. По осям ординат отложено время в миллионах лет, отсчитываемое от начала коллапса протозвезды и назад от текущего момента. По другой координате задаются массы природной системы (основного объекта) и ее (его) базового элемента. Шкала масс до и после значения  $10^{16}$  г различны.

Возникновение жизни в Солнечной системе начиналось с этапа «Холодной предыстории жизни» [19]. Объектом эволюции на этом этапе выступало молекулярное облако. Базовым элементом в нем служит газ из молекулярного водорода с гелием. Процессом самоорганизации являются гравитационные коллапсы в молекулярном облаке, ведущие к кластеру из молодых звезд [6]. Одна из звезд такого кластера, Солнце, возникло свыше 4,56 миллиарда лет назад. Основные параметры молекулярных облаков до развития в них коллапсов указаны в монографии [13]. По порядку величины один процент массы молекулярного облака переходит в протозвезды и звезды с их околозвездными дисками [6]. Источником неустойчивости и процесса самоорганизации формирования звезд служит пыль, содержание которой в среде порядка 1–2% по массе. За времена порядка 100 тысяч лет формируется протозвезда с массой масштаба одной десятой массы Солнца. Она окружена массивным аккреционным диском. Это по наблюдениям молодые звездные объекты YSO (Young Stellar Objects) классов 0/I [6, 7]. Вещество из диска и окружающего молекулярного облака коллапсирует на протозвезду, у которой зажигаются ядерные реакции, увеличивается масса и светимость. Температура газа в диске повышается от 10–20К молекулярного облака. Она в основном определяется газодинамикой гравитационного коллапса с учетом реального уравнения состояния у смеси водород – гелий.



**Рисунок 1.** Возникновение жизни в Солнечной системе. Появление жизни и эволюция биосферы на Земле. Зависимость времени появления этапа самоорганизации от массы новых подсистем (линии справа) и их базовых элементов (линии слева). Начало времени по левой оси ординат отсчитывается от гравитационного коллапса, формирующего Солнце.

Следующий этап – «Допланетный хемоценоз». На этом этапе околозвездный диск на масштабах 100 тысяч лет от начала гравитационного коллапса представляет собой новый объект [6–11]. Базовым элементом в нем выступает нанодисперсная пыль и молекулы – автокатализаторы. Этот объект является результатом самоорганизации в молекулярном облаке на предыдущем этапе. Некоторое время (порядка миллиона лет) аккреционный диск и протозвезда эволюционируют вместе. К окончанию этого пе-

риода появляется молодая звезда – раннее Солнце. Газ диска, определяющий его массу на этом этапе, имеет спадающее к периферии диска распределение давления и температуры. Пыль оседает к срединной плоскости диска. В этом месте отношение массы пыли к массе газа повышается, и формируется пылевой субдиск. С частью пыли проходят столкновительные процессы укрупнения с появлением «булыжников» и рыхлых первичных тел массой порядка тонны и размерами до 10 метров. С большими размерами первичные тела в столкновениях разрушаются. Дальнейший рост тел происходит в результате коллективного объединения многих тел при развитии гравитационной неустойчивости с участием газа. На поверхности этих тел адсорбировалась вода и все химические соединения, за исключением простых газов. В широких условиях по давлению и температуре диска в этих соединениях проходят химические процессы. Среди этих процессов выделяются различные синтезы органических соединений с участием каталитически активной поверхности этих тел. Гетерогенные каталитические реакции ведут к модификации химического неорганического состава тел. Первичные тела связываются органикой, в том числе при ее полимеризации. Для полимеризации неорганическая компонента является катализатором, обеспечивая процессы при низких температурах. Весь набор органических синтезов и других химических процессов в восстановительной водород-гелиевой атмосфере диска определен как «Допланетный хемосенз». В этом наборе химических реакций определенное преимущество и определенный отбор в конечном итоге получали автокаталитические процессы. Примером такого процесса может служить синтез этилена из этана, в котором этилен является гомогенным автокатализатором [22]. Благодаря всем физико-химическим процессам укрупнения твердой фазы появляются первичные тела – булыжники. Часть из них, не вошедшая позднее в более крупные тела и претерпевшая за миллиарды лет дальнейшие изменения, представлена метеоритами. Характерная масса диска, определяемая в основном газом из водорода и гелия, составляет по порядку величины 0,1 массы Солнца. Масса конденсированной фазы – менее 0,001 массы Солнца, что оценивается по содержанию элементов тяжелее гелия («металлов») в Солнечной системе. Эффективность получения конденсированного вещества в диске относительно всего диска составляет порядка 1%, что оценено по массе современной Солнечной системы.

Условия этого этапа подготовили возможность следующего процесса самоорганизации – возникновения и эволюции «Мира РНК» в органическом веществе субдиска первичных тел. Этот процесс идет на фоне самоорганизации формирования планетной системы. Протозвезда при аккреции вещества из диска достигает массы Солнца. Диск становится неустойчивым относительно развития гравитационных и других неустойчивостей в двухфазной среде газ – твердые тела. При развитии неустойчивостей возникают клампы – области формирования планетезималей и зародышей

планет с условиями высоких давлений газа и повышенных температур. В диске на удалении будущей Земли от Солнца температура газа достигала 1000К, при которой идет большинство химических реакций. При меньших температурах соответственно на больших удалениях от Солнца эффективно проходят каталитические процессы. Эти же температуры возникали в формирующихся клампах на больших расстояниях от Солнца. В клампах при слипании твердой фазы формируются многокилометровые тела – планетозимали. В конденсированной фазе сосредоточена вода, органические вещества и катализаторы – будущие оливины и другие компоненты, видимые по составу метеоритов – углистых хондритов. На этих телах происходят синтезы «Мира РНК» с формированием молекулярных колоний [20]. Столкновения тел приводят к обмену продуктами синтезов между телами и к распространению наиболее устойчивых молекулярных колоний. Изменяющиеся физические условия на твердой фазе приводили к отбору наиболее устойчивых молекул, среди которых имеются и автокатализаторы. К ним следует отнести в качестве базовых элементов РНК как наиболее универсальные соединения, способные выполнять самые разные функции. Оценка массы «Мира РНК» дает значения в  $10^{28} - 10^{29}$  г, которые получаются из современной массы неорганического вещества на расстояниях от Меркурия до пояса астероидов. «Мир РНК» постоянно терял свою массу. Время, которое занимал этап «Мира РНК», составляет несколько миллионов лет. Этот этап заканчивается потерей газа из диска, формированием зародышей планет и газовых гигантов, переходом к осколочному (дебрис) диску [6].

Потеря диском газов с падением давления водорода с гелием повела «Мир РНК» к разрушению. Но этот же уход водорода с гелием отобрал среди всех молекулярных колоний те, которые смогли сформировать защитную оболочку – мембрану. Это привело к формированию отдельных организмов (клеток). Среди множества организмов устойчивыми к воздействию изменяющейся космической среды оказались сообщества тех, которые взаимно дополняли друг друга как продуценты и редуцторы на первичных телах и планетезималиях. На первичных телах диска, поверхность которых смочена водой, в виде биопленок возникла «Допланетная биосфера». Это и есть главный этап возникновения жизни в Солнечной системе.

Итак, химические процессы с органическим веществом на первичных телах и планетезималиях с интенсивным обменом веществом между телами в их столкновениях между собой сталкиваются с потерей водорода и гелия – основных газов восстановительной атмосферы в диске. Диск как объект самоорганизации в образовании планет становится роем осколочных тел (дебрис – диск). Отдельные тела и зародыши планет выступают для диска как базовые элементы. Солнце вышло на главную последовательность. В зоне образования планет происходит разложение и потеря основного количества существовавшего органического вещества. Остается только то ве-

щество, которое смогло сформировать защитную оболочку – мембрану (клетку) и сообщества, которые могли продолжать в виде биопленок обмен веществом на отдельных телах. Сформировалась общая допланетная экосистема или многие экосистемы (биоценозы) на множестве сталкивающихся тел, для которой базовым элементом является отдельный организм (клетка). Отбор шел по разным условиям – температуре, давлению, устойчивости к ударам и прочим параметрам. Остатки этапа «Допланетной биосферы» – в метеоритах, на Земле, возможно на других телах Солнечной системы. Сложно сказать, являются ли существующие земные прокариоты теми организмами, которые сформировались на этом этапе.

В осколочном (дебрис) диске за несколько десятков миллионов лет заканчивается формирование Солнечной системы, которая включает планеты, астероиды, метеориты, кометы и крупные тела в поясе Кипера-Белта и облаке Оорта. Формирование планет на этом этапе связано с аккумуляцией небольших тел и крупных планетезималей несколькими зародышами. Ясно, что при такой аккумуляции допланетные биоценозы на поверхности тел попадают на зародыши планет (протопланеты) и, в основном, разрушаются. Но это разрушение органических соединений и биоценозов обеспечивает азот, углекислый газ и воду в атмосфере протопланет. Этот этап с мощным разложением органических соединений и вещества биоценозов и есть стадия «Деструктивной биосферы». На Земле она продолжалась первые 400–600 миллионов лет. Объектом самоорганизации является биосфера на поверхности Земли. Базовым элементом для нее остается отдельный организм (клетка) в разнообразии, унаследованном от «Допланетной биосферы».

Молодая Земля, подвергаемая бомбардировке, диктует биосфере свои условия. Для этих условий происходит формирование земной биосферы. На поверхности Земли при разложении всех органических соединений появилась вода. Запускается геохимический цикл, который приводит к выводу двуокиси углерода из атмосферы и к появлению осадочных пород примерно 4 миллиарда лет назад. Появление современной кислородной атмосферы и формирование «Планеты бактерий» на Земле в географической оболочке – это следующий этап в самоорганизации, но уже на Земле. Этот этап уже документирован геологическими образцами пород. Для этапа деструкции с выходом на фотосинтезирующий биоценоз первичная земная биомасса может быть оценена в  $2,4 \cdot 10^{22}$  г по углероду. При переходе к "планете бактерий" за ее массу может быть принято современное значение  $2 \cdot 10^{18}$  г.

Изложенный сценарий возникновения жизни должен уточняться новыми наблюдательными данными, компьютерным моделированием и целенаправленным лабораторным экспериментом. Полученные в последнее время качественно новые данные с эксплуатируемых в мире телескопов различного спектрального диапазона позволили серьезно углубиться в

изучение тех особых условий в космосе, о которых писал В.И. Вернадский. Проектируемые телескопы следующих поколений призваны изучать начальные химические процессы, связанные с возникновением жизни около других звезд. Компьютерное моделирование, направленное на все этапы самоорганизации и на наблюдения с экспериментами, позволяет создавать модели разного уровня сложности. Эти модели призваны дать понимание основных процессов, которые привели к возникновению жизни в Солнечной системе и, возможно, около других звезд. Для расшифровки спектров в наблюдениях с телескопов также остро необходимы лабораторные эксперименты. Однако эти эксперименты нужны и для воспроизведения отдельных физико-химических процессов, протекающих в околозвездных дисках на разных этапах их эволюции и прямо увязанных с предбиологическими синтезами органических соединений. Для активных зон диска с найденными в них физическими условиями необходимо проводить лабораторное моделирование химических процессов с определением выходов основных продуктов реакций и констант наблюдаемой химической кинетики. Эти константы могут далее закладываться в компьютерные модели локальных химических превращений для дальнейшего воспроизведения сценариев предбиологических синтезов в диске.

Тем самым, современные лабораторные исследования химических процессов для сценариев образования планет в дисках, найденных наблюдательными и вычислительными методами, могут указать следующие перспективные направления для поиска ответа на вопрос о происхождении жизни в Солнечной системе и о ее существовании на планетах около других звезд.

### Литература

1. *Вернадский В.И.* «Живое вещество и биосфера» – М.: Наука, 1994. – 277 с.
2. *Герасименко Л.М., Жегалло Е.А., Жмур С.И., Розанов А.Ю., Хувер Р.* Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // Палеонтологический журнал, 1999, № 4, с. 103–125.
3. *Снытников В.Н.* Астрокатализ – абиогенный синтез и химическая эволюция на догеологических этапах формирования Земли / Проблемы происхождения жизни. ПИН РАН, Под ред. *Розанов А.Ю., Лопатин А.В., Снытников В.Н.*, 2009, С. 79–101.
4. *O'dell C.R.* Wen Zheng Postrefurbishment mission Hubble Space Telescope images of the core of the Orion Nebula: Proplyds, Herbig-Haro objects, and measurements of a circumstellar disk. Part 1 // *Astrophysical Journal*, 1994, vol. 436, no. 1, p. 194–202.
5. *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-mass companion to a solar-type star // *Nature*, 1995, vol. 378 (6555): p. 355–359.
6. *Protostars and Planets VI.* H. Beuther, R.S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 2014, 914 pp. (Международная конференция. Гейдельберг, Германия, Июль 15–20, 2013).
7. *Hartmann L.* Accretion processes in star formation. Cambridge University Press, 2009
8. *Norbert S. Schulz.* The Formation and Early Evolution of Stars. From Dust to Stars and Planets/ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, 529 p.

9. *Armitage, P.J.* Dynamics of Protoplanetary Disks // Annual Review of Astronomy and Astrophysics 49: 2011, 195–236.
10. *J.P. Williams and L.A. Cieza.* Protoplanetary Disks and Their Evolution // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2011, vol. 49, issue 1, pp. 67–117.
11. *Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней солнечной системы. Космохимические и физические аспекты – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 264 с.
12. *Herbst E. and van Dishoeck E.F.* Complex Organic Interstellar Molecules // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2009, v. 47, p. 427–480.
13. *Бочкарев Н.Г.* Основы физики межзвездной среды – М. 2010. – 352 с.
14. *Снытников В.Н.* Абиогенный допланетный синтез пребиотического вещества // Вестник РАН, 2007, т. 77, № 3, с. 218–226.
15. *Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 328 с.
16. *Заварзин Г.А.* Первые экосистемы на Земле // Проблемы происхождения жизни. ПИН РАН, под ред. *Розанов А.Ю., Лопатин А.В., Снытников В.Н.*, 2009, с. 230–244.
17. *Заварзин Г.А.* Начальные этапы эволюции биосферы // Вестник РАН, 2010, т. 80, № 12, с. 1085–1098.
18. *Snytnikov V.N.* Astrocatalysis – Abiogenic Synthesis and Chemical Evolution at Pregeological Stages of the Earth's Formation // Paleontological Journal, 2010, vol. 44, p. 761.
19. *Гольданский В.И.* Нетрадиционные механизмы внеземного образования органических соединений // Изв. Академии наук. Серия хим., 1997. 3, с. 409–417.
20. *Спирин А.С.* Биосинтез белков, мир РНК и происхождение жизни // Вестник РАН, 2001, т. 71, № 4, с. 320–328.
21. *Заварзин Г.А.* Планета бактерий // Вестник РАН, 2008, т. 78, № 4, с. 328–336.
22. *Снытников В.Н., Мищенко Т.И., Снытников Вл.Н., Стояновская О.П., Пармон В.Н.* Автокаталитическое газофазное дегидрирование этана в «бесстеночном» реакторе. // Кинетика и катализ, 2010, т. 51, № 1, с. 10–17.

## **Chapter 19**

### **PREBIOLOGICAL SYNTHESIS ORGANIC MATTER AND ORIGIN OF LIFE IN PROTOPLANETARY DISKS**

© **V.N. Snytnikov**

*Novosibirsk State University,  
Novosibirsk, Russia*

Processes and conditions around new born Sun and possibly other young stars led to the origin of life in the circumstellar disc in a few million years. Than the circumsolar biosphere evolved to its current earth state. In agreement with the main results of the natural sciences and the theory of self-organization, several stages are necessary for the life to emerge on the Earth. Nowday we can specify "The cold prehistiry of the life", "RNA-world", "Preplanet biosphere", "Destructive biosphere", "Earth of bacteria".

*Глава 20*

**ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ – ИСТОРИЯ ЖИЗНИ**

© **А.Ю. Розанов**

*Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН,  
Москва, Россия*

На сегодняшний день появляется всё больше и больше доказательств, что жизнь – это явление галактических масштабов, и вопрос о происхождении жизни следует передвинуть на более раннее время, по крайней мере, на 1–2 млрд. лет от привычной датировки. Процессы формирования жизни могли начинаться уже на этапе формирования звездных скоплений из молекулярных облаков, что приводит к необходимости рассмотрения возможного существования мира РНК до 7 млрд. лет назад. Верификация физических условий на ранней Земле последними астробиологическими и палеонтологическими данными показывает, что оптимальные условия существования древних бактерий предполагают среднюю температуру океана несколько выше сегодняшней. Также благодаря исследованиям последних двух десятилетий по палеонтологии докембрия и бактериальной палеонтологии отвергается гипотеза о бескислородной атмосфере Земли в первые 2 млрд. лет её геологически документированной истории (4,0–0 Ga).

Огромное влияние процессов, происходящих в солнечной системе и, вообще, во Вселенной, на развитие жизни на Земле, априори не вызывает сомнения. Однако попытки установить конкретную зависимость между явлениями в солнечной системе, Вселенной и биосфере Земли обычно приводят к выводу, что эта зависимость нелинейная [3]. Понятие «панспермии» возникло почти два века назад. И оно, само по себе, предполагало как наличие жизни не только на Земле, так и, естественно, взаимосвязь различных процессов на Земле в Солнечной системе и, вообще, во всей Вселенной. Долгое время понятие панспермии воспринималось с некоторой иронией и несколько поддерживалось только авторитетом В.И. Вернадского.

Поэтому последнее время особенно важным оказались данные, которые принципиально изменили наши представления о характере появления и развития жизни на Земле.

В истории становления жизни на Земле или, вернее, приживания жизни на Земле, долгое время господствовало убеждение относительно того, что жизнь произошла на Земле, и это представление захватило почти все умы ученых, и внедрилось во все учебники, и совершенно естественно, автоматически, люди употребляли выражение «возникновение жизни на Земле». На самом деле, это не совсем так, или, скажем, совсем не так.

Внедрение электронной микроскопии и пристальное внимание к палеонтологическим остаткам в глубоком докембрии привели к существенному изменению представлений. Надо сказать, что когда Б.С. Соколов в свое время произнес словосочетание «палеонтология докембрия», это вызывало

некое смущение и, иногда, скепсис. Но позднее оказалось, что в докембрии очень много палеонтологических остатков, которые могут существенно повлиять на интерпретацию того, что происходило на Земле. Более того, в последнее время уже словосочетание «палеонтология архея» не кажется фантазией, и в архее мы находим огромное количество ископаемых, фоссилизированных остатков, которые показывают, что наши представления о характере протекания биосферных процессов и, естественно, качестве жизни на Земле, принципиально иные, чем ранее считали. Очень важным было и то, что, наконец, в сознание исследователей внедрилась важная мысль, что самый главный элемент оценки состояния того, что происходит на Земле – это знание об уровне организации тех организмов, которые жили в то время, а совсем не петролого-геохимические и минералогические данные, на основе которых строились представления о температурных условиях, о состоянии, качестве и составе атмосферы, о наличии или отсутствии воды и так далее [4–8, 12, 14].

Сегодня мы можем уверенно выделить некоторые важнейшие этапы в развитии жизни на Земле и в развитии самой Земли, вернее, в эволюции условий на поверхности Земли. До 4 Ga у нас, вероятнее всего, не было никаких значимых количеств воды на поверхности Земли. И это убеждение, или этот вывод происходит от того, что мы не знаем никаких осадочных пород возраста древнее 4 Ga, потому что, если была бы вода, то неизбежно были бы и осадочные породы. Правда, в последнее время в конгломератах более молодых пород в Австралии были обнаружены отдельные зерна цирконов, их возраст – 4,1, 4,2 и даже 4,4 Ga. Однако анализ морфологии этих зерен вступает в противоречие с заключением о якобы водном их происхождении. Не могут быть приняты в качестве доказательства и данные об изотопии кислорода, так как они не свидетельствуют о формировании их в водной среде. Таким образом, зерна циркона никакого отношения к воде на поверхности Земли не имеют. Их происхождение, возможно, импактное, и, скорее всего, импактное, но никак не осадочное.

Как полагают Кузьмин и Ярмолюк [2], «с 4,5 до 4 млрд лет существовал магматический океан глубиной до 700 км. Это время отличается, прежде всего, интенсивными массивными астероидными бомбардировками, которые уничтожили внешнюю оболочку планеты, утопив ее блоки под слоями коматиитов, излившимися вследствие бомбардировок».

Следующий момент, который очень важен [4, 8] для понимания того, что происходило на Земле, – это данные по Исуа, то есть по гренландским породам, в которых обнаружены некие остатки, про которые обычно многие пишут, что это вообще не органические остатки, однако, анализ изотопного состава, который проделал в свое время Шидловский, показывает, что не только это остатки, которые ничем принципиально не отличаются от остатков, которые всеми признаются за органические из Ганфлинта, но и даже есть подозрение, что там присутствуют, исходя из изотопных дан-

ных, какие-то остатки эвкариотических водорослей. Если это так, то это принципиально для вопроса о том, что среда, в которой накапливаются остатки Исуа из Гренландии, формировалась в более-менее нормальных, то есть, сходных с фанерозойской ситуацией, условиях.

Очень важным подспорьем и подтверждением этой мысли служит капитальная работа сотрудников Геологического института и Института геохимии во главе с О.М. Розеном [11], в которой после детальной обработки метаморфических архейских пород, они пришли к выводу, что совокупность тех пород, которые образовывались в архее, и тех пород, которые существуют потом в фанерозое, принципиально не отличаются. Это очень важно, потому что в результате можно задать вопрос: каким же образом, если породы не отличаются, существует легенда о том, что существенно отличается состав атмосферы? Что около двух миллиардов она была бескислородной, а потом быстро стала почти такой, как сегодня?

Следующий момент, очень важный – это работы, которые проводились уже по архейским и раннепротерозойским отложениям. В свое время в кремнеземных породах американские исследователи находили и показали, что там довольно много бактериальных остатков, часть которых интерпретировалась как остатки цианобактерий. Долгое время было убеждение, что сохранность этого материала специфична только для кремнеземных, в основном, доломитовых пород. Особенно интенсивное изучение древних пород стало проводиться в Палеонтологическом институте РАН [1, 5–10, 12, 14], и выяснилось, что в архейских породах везде есть, иногда совершенно изумительной сохранности, остатки бактериального мира, а иногда даже протистов. То есть, одноклеточных эвкариот. Это, естественно, совершенно никак не увязывается с представлениями о бескислородной среде в архее. Более того, классические представления о возрасте джеспилитов базируются на тех площадях джеспилитов, которые имеют архейский возраст. Однако, почему-то как в западной, да и в российской литературе, упоминания джеспилитов гораздо более молодых, то есть, верхнепротерозойских и даже фанерозойских, которые имеют место и широко распространены в Южной Сибири, почему-то отсутствуют. Но, если мы имеем джеспилиты этого возраста, то нет никаких оснований считать, что джеспилиты архейские – это показатель бескислородной среды. Надо думать о том, что происходило в этот момент, и почему образовывались джеспилиты. Надо сказать, что в последних работах о джеспилитах появилась информация о том, что, возможно, в джеспилитах присутствуют цианобактерии. Но если это так, то это – лишнее подтверждение того, что кислорода, вероятно, было достаточно много. Более того, одним из аргументов бескислородной среды были работы по описанию уранинитов и неокисленных пиритов из архейских отложений Африки. Надо сказать, что изображения из якобы окатанных зерен с уранинитом так же показывают, что интерпретация окатанности здесь сильно хромает, потому что размер зерен таков, что окатываться

этот материал не мог, и, вероятно, происхождение этих уранинитов совершенно иное, скорее всего, это ископаемые колонии бактерий. Более того, вызывает некоторое сомнение утверждение о том, что неокисленные пириты свидетельствуют об отсутствии кислорода в атмосфере. Вспомним, что в любом минералогическом музее есть экспонаты пиритов, и большинство из них неокисленные. Сегодня в атмосфере кислорода довольно много. Возникает вопрос: почему же архейские неокисленные пириты могут служить доказательством отсутствием кислорода в атмосфере?

Очень важно иметь в виду, что имеются разные представления по поводу температуры поверхности Земли после ее образования. Существуют две противоположные точки зрения, одна из которых – это представление о том, что вся поверхность ранней Земли была покрыта водой, и второе – что поверхность была достаточно горячей, поскольку состояла из расплавленной магмы. Естественно, этот расплав покрывался тонкой твердой коркой, которая систематически взламывалась, и эти обломки снова расплавлились. Вторая точка зрения, вероятно, более правдоподобна [2], особенно еще в связи с тем, что реальных данных о состоянии поверхности Земли во временном интервале 4,5–4,0 Ga нет. Если бы Земля в этот момент была покрыта водой (в соответствии с первой точкой зрения), то было бы естественно образование осадочных пород, следов которых мы не имеем. Вода в значимых количествах появляется только с приблизительно 4 Ga [8].

Идея выхода жизни из океана на сушу, причем очень поздно (Ордовик), теперь не может уже рассматриваться серьезно в связи с находками микроорганизмов в древних корах выветривания. Это свидетельствует о том, что жизнь появилась очень рано на суше, и, скорее всего, не из океана, которого еще не было.

Очень важны также данные по Pechengia, Gazavazinia, панцирным амебам, возможным хитинозоям, Udokania и т.д. Все это эвкариоты и, возможно даже, многоклеточные Metozoa [4, 6, 7, 9, 10, 12, 14].

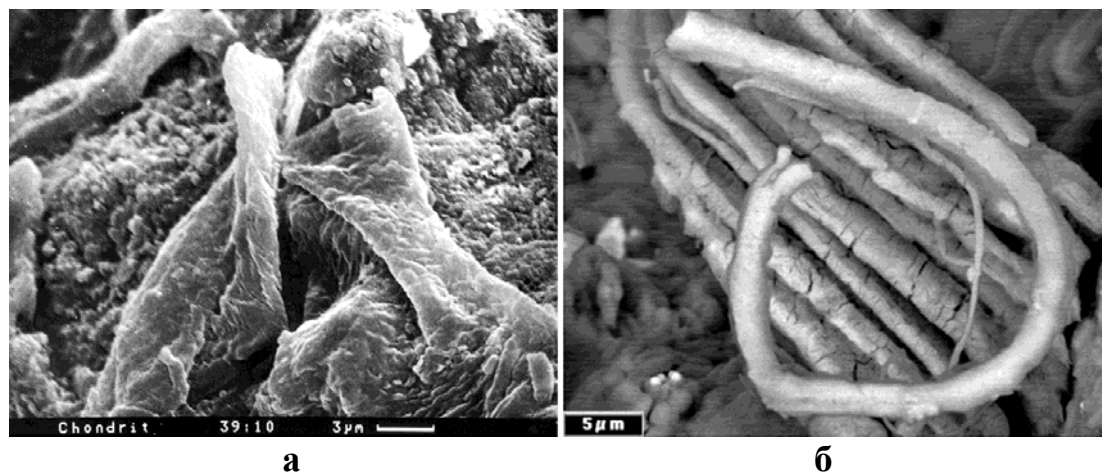
Следует обратить внимание на то, что стало очевидным наличие фоссильных организмов в метеоритах (речь идет, конечно, об углистых хондритах). Наиболее часты находки прокариотных фоссильных (рис. 1).

Однако сегодня достаточно много обнаружено и фоссильных эвкариот (рис. 2).

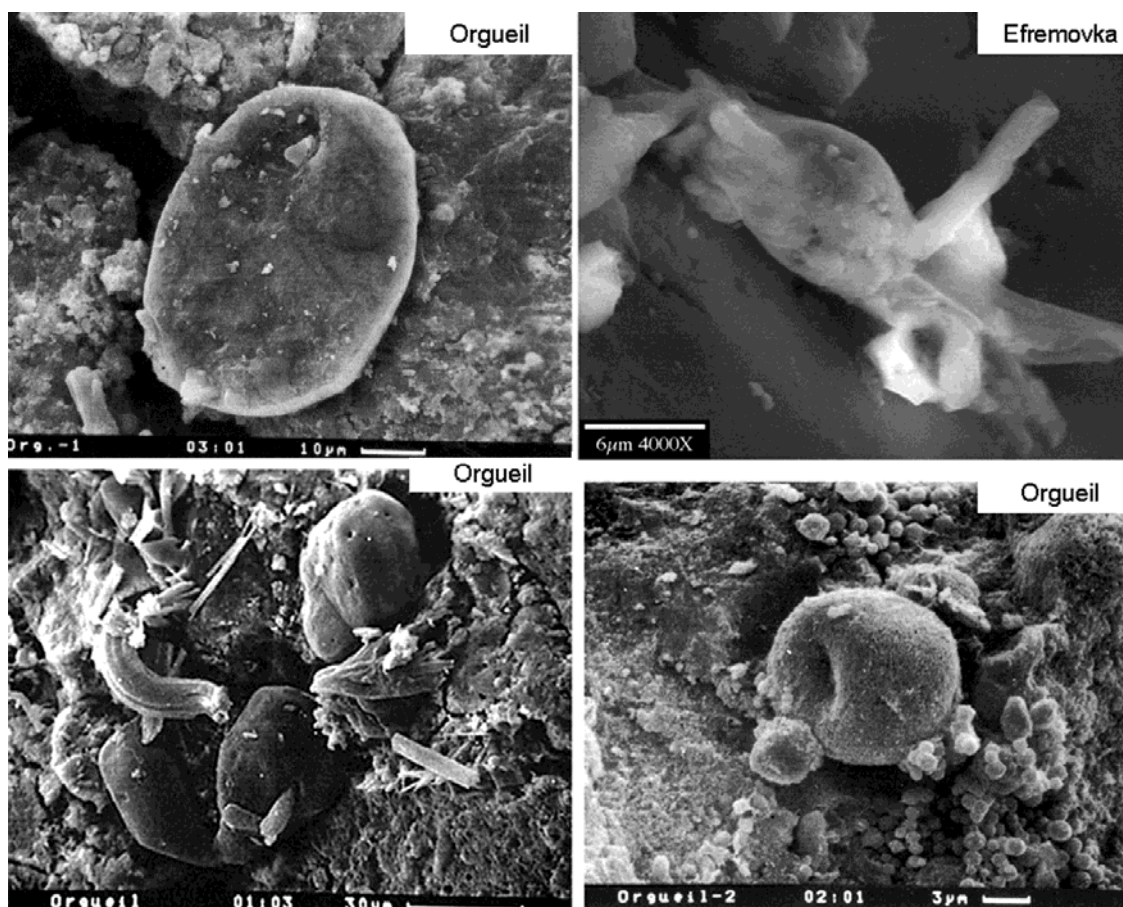
Особенно интересно наличие в Оргее магнето-тактических бактерий, что говорит о наличии магнитного поля, атмосферы и водных бассейнов на планете, фрагментом которой является этот метеорит.

Таким образом, в результате исследований последних двух десятилетий по палеонтологии докембрия и бактериальной палеонтологии выяснилось, что вода на поверхности Земли в значимых количествах появилась только около 4,0 Ga лет тому назад, и в древнейших породах сразу обнаруживаются организмы, возможно, уже достаточно высокого уровня организации, свидетельствующие о присутствии в атмосфере значительного

количества кислорода. Ассоциации организмов появляются на суше, так же как и, возможно, в каких-то водоемах, образуя устойчивые сообщества, быстро колонизирующие земную поверхность. Появление этих организмов регламентирует и содержание кислорода, и наличие воды, и не очень высокие средние температуры поверхности, лишь незначительно отличающиеся от современных (рис. 3).



**Рис. 1.** Прокариоты в метеоритах: **а** – Ефремовка, **б** – Оргей.



**Рис. 2.** Эвкариоты в метеоритах.

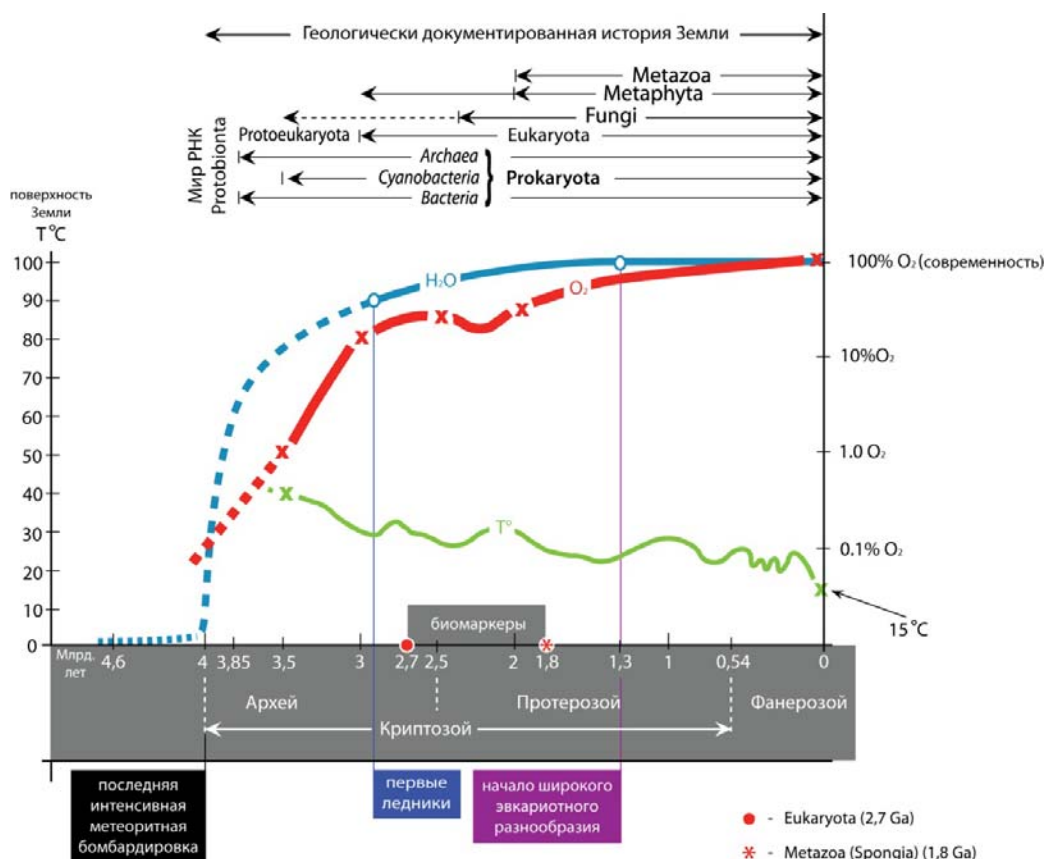


Рис. 3. Интегральная картина некоторых гео-биологических событий в докембрии.

В последнее время появляется все больше и больше данных об образовании сложных биологических молекул в открытом космосе, параллельно с чем разрабатывается интересное построение по поводу астрокатализа [13]. Кроме того, появились представления о возможности образования мира РНК еще до образования Земли. В этой связи суммарная картина развития органического мира может быть представлена достаточно приближительной схемой (рис. 4).

На сегодняшний день появляется всё больше и больше доказательств, что жизнь – это явление галактических масштабов, и вопрос о происхождении жизни следует передвинуть на более раннее время, по крайней мере, на 1–2 млрд. лет от привычной датировки. Экспериментальный материал по химическому составу молекулярных облаков в межзвездном пространстве предполагает наличие активного добиологического синтеза сложных органических веществ. Это расширяет время возможного существования мира РНК до 7 млрд. лет назад.

Верификация физических условий на ранней Земле последними астробиологическими и палеонтологическими данными показывает, что оптимальные условия существования древних бактерий предполагают среднюю температуру океана несколько выше сегодняшней. Это ставит под сомнение гипотезу «Земля – снежок» в первые 500–700 млн. лет существо-

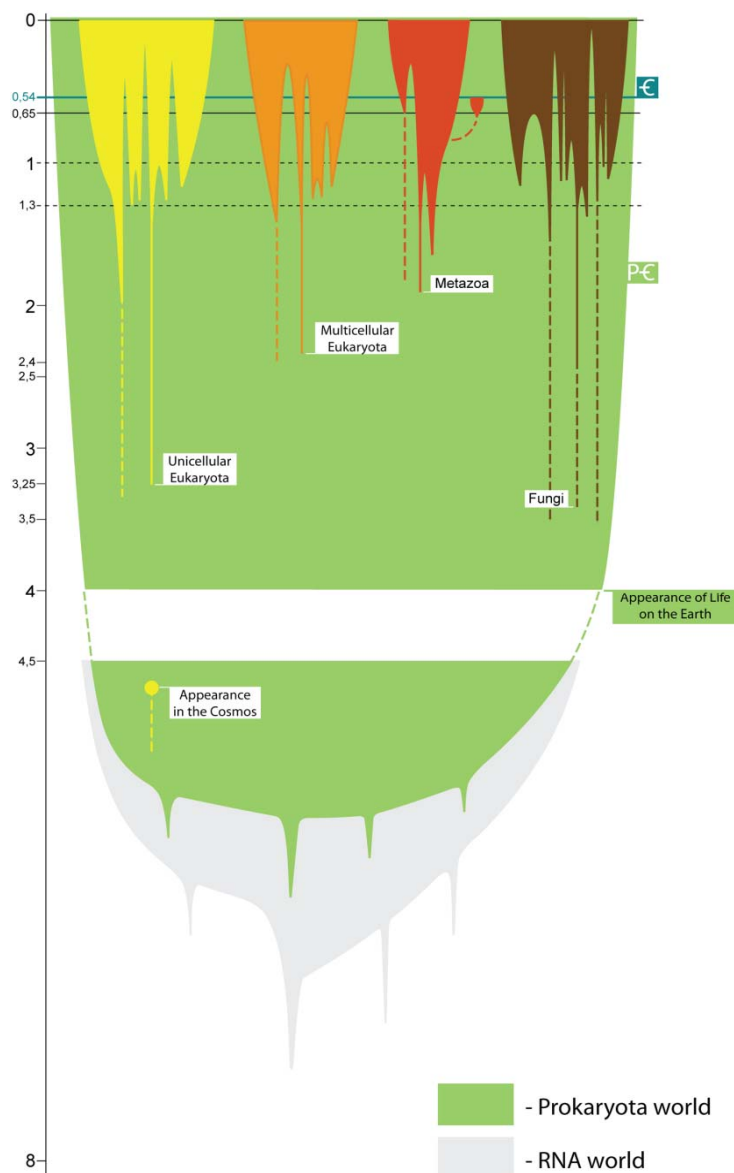


Рис. 4. Схематичная картина развития органического мира.

вания нашей планеты. Также благодаря исследованиям последних двух десятилетий по палеонтологии докембрия и бактериальной палеонтологии отвергается гипотеза о бескислородной атмосфере Земли в первые 2 млрд. лет её геологически документированной истории (4,0–0 Ga).

### Литература

1. Астафьева М.М. Древнейшие коры выветривания и проблема бактериальной колонизации суши // Палеонтология. Стратиграфия. Астробиология. К 80-летию А.Ю. Розанова. Москва, ПИН РАН, 2016. С. 31–43.
2. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Изменение стиля тектонических движений в процессе эволюции Земли // ДАН, 2016, т. 469, № 6, с. 706–710.
3. Космические факторы эволюции биосферы и геосферы. Астрономическое общество, междисциплинарный colloquium. Москва, 21–23 мая 2014 г. // Сборник статей. СПб, 2014.
4. Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. 258 с.

5. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестник РАН, 1997, т. 97, № 2.
6. Розанов А.Ю., Астафьева М.М. Празинофиты (зеленые водоросли) из нижнего протерозоя Кольского полуострова // Палеонтологический журнал, 2008, № 4, с. 90–93.
7. Розанов А.Ю., Астафьева М.М., Вревский А.Б., Алфимова Н.А., Матреничев В.А. Микрофоссилии раннедокембрийских континентальных кор выветривания Фенноскандинавского щита // Отечественная геология, 2008, № 3, с. 83–90.
8. Розанов А.Ю. Условия жизни на ранней Земле после 4.0 млрд. лет назад / Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. С. 185–198.
9. Розанов А.Ю., Астафьева М.М. Уникальная находка древнейших многоклеточных водорослей из нижнего протерозоя (2,45 млрд лет) Кольского полуострова // ДАН, 2013, т. 449, № 3, с. 367–369.
10. Розанов А.Ю., Астафьева М.М., Зайцева Л.В., Алфимова Н.А., Фелицын С.Б. Цианобактерии (?) в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии // ДАН, 2016, т. 470, № 3, с. 1–3.
11. Розен О.М., Аббясов А.А., Аксаментова Н.В. и др. Седиментация в раннем докембрии: типы осадков, метафорфизованные осадочные бассейны, эволюция терригенных отложений. М.: Научный мир. 2006. 398 с. (Тр. Геол. Ин-та. Т. 569)
12. Astafieva M., Rozanov A. Bacterial-paleontological study of early Precambrian weathering crusts // Earth Science Research, 2012, vol. 1, № 2.
13. Di Mauro E. Origin of life made closer at Dubna accelerators // Современные направления в радиобиологии и астробиологии. Молекулярные, генетические, клеточные и тканевые эффекты // Дубна, 28–30 октября 2015 г. Труды конференции. Дубна, 2015.
14. Rozanov A.Yu., Astafieva M.M., Hoover R.B. The early Earth and its environments // Proc. SPIE, 2008. V. 7097. 709707-1 – 709707-15. doi:10.1117/12.791902

## **Chapter 20**

### **HISTORY OF THE EARTH – THE HISTORY OF LIFE**

© **A.Yu. Rozanov**

*A.A. Borisyak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

To date there is more and more evidence that life is a phenomenon of galactic scale, and the problem of the life origin should be moved to an earlier time, at least 1–2 billion years from the usual dating. The process of life formation could begin already at the stage of the formation of solar clusters from molecular clouds, which leads us to consider the possible existence of an RNA world up to 7 billion years ago. Verification of physical conditions on the early Earth with the latest astrobiological and paleontological data shows that the optimal conditions for the existence of ancient bacteria suggest that the average temperature of the ocean is slightly higher than today. Also, thanks to the studies of the last two decades, the hypothesis of the oxygen-free atmosphere of the Earth in the first 2 billion years of its existence is rejected.

*Глава 21*

**ЖИВОЕ. ОТ ПРИНЦИПОВ К МЕХАНИЗМАМ**

© **В.А. Твердислов**

*Физический факультет Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*«Насколько я знаю, все физические результаты  
a priori имеют свои источники в симметрии»*

*Герман Вейль*

*«Развитие Вселенной с момента ее возникновения выглядит  
как непрерывная последовательность нарушений симметрии...  
Феномен жизни естественно вписывается в эту картину».*

*Фриман Дж. Дайсон*

*«Присущая явлениям симметрия – это максимальная симметрия, совмести-  
мая с существованием явления. Определенные элементы симметрии мо-  
гут сосуществовать с определенными явлениями, но они не являются не-  
обходимыми; необходимо лишь отсутствие определенных элементов  
симметрии. Именно асимметрия создает явление».*

*Пьер Кюри (1894)*

Понятия симметрии, нарушения симметрии и асимметрии следует отнести к фундаментальным факторам происхождения и развития жизни. Следует также считать, что в возникновении жизни на Земле и в биологической эволюции физические факторы первичны, а химические инструменты и биологическое их воплощение являются системной реализацией. Представлено обоснование и развитие гипотезы о спонтанном возникновении дискретных везикул, предшественников живых клеток, на термодинамически неравновесной границе океан–атмосфера, способной формировать две фундаментальные биологические асимметрии: ионную (клеточную) и хиральную (молекулярную). Гомохиральность аминокислот и дезоксирибозы послужила физической основой формирования для белков и нуклеиновых кислот знакопеременных структурных хиральных иерархий, определивших механизмы фолдинга и функционирование макромолекул как молекулярных машин.

Основной вопрос астробиологии о возможности существования и о возможных формах внеземной жизни непосредственно связан с фундаментальной проблемой, касающейся самой сущности жизни в целом, её материальных носителей и её происхождения. По существу – что нам искать во Вселенной и что уметь увидеть? Основная идея настоящей главы состоит в том, что универсальные проявления Жизни следует искать не в химических подобию составляющих её молекулярных конструкций, а в общих физических принципах её системной организации. Эта же мысль может оказаться полезной при рассмотрении вопроса о происхождении жизни на Земле как модели её появления.

Выдающиеся достижения биохимии и молекулярной биологии последних 50–70 лет в изучении жизненных процессов заслонили принципиальные для биологии фундаментальные физические принципы организации и функционирования живых систем, сформулированные в 30-е – 60-е годы прошлого столетия. Каким-то образом исчезло из рассмотрения ключевое для биологической эволюции положение: естественный отбор в биологии происходит по физическим, а не по химическим критериям. Отбор идёт не по нуклеотидам, липидам или аминокислотам, а по способности организмов к эффективному преобразованию энергии световых квантов в электронный транспорт, по способности организмов развивать высокую скорость или ускорение, по способности различать звуковые или оптические длины волн и т.д.

Самые общие принципы построения живого – дискретность, неравновесность, нелинейность, синергизм, иерархичность, машинность, сочетание фазовых состояний, а также квантовых и макроскопических масштабов и процессов, системность и пр. – являются физическими. Тогда как универсальный «химический» инструментарий позволяет эффективно реализовать характерные для биосферы Земли самые разнообразные формы жизни. Именно благодаря достижениям химии пришло время по-новому осмыслить фундаментальные основы биологического знания – проблемы эволюционной целесообразности гармонического сочетания физических принципов и механизмов функционирования живых систем. А не только «структуры и функций», как говорили ещё недавно.

Все базовые физические законы и закономерности с необходимостью исполняются в живой природе, и на настоящий момент представляется убедительным, что их вполне достаточно для её понимания. Вместе с тем, законы и закономерности мира элементарных частиц и законы мегамира Вселенной вряд ли непосредственно участвуют в процессах жизнедеятельности существующих на Земле организмов, поскольку природа «вырезала» очень узкий диапазон в пространстве размеров и размерностей, времён и энергий, для которого характерен весьма широкий набор фазовых состояний вещества и структурных (химических) трансформаций. Вместе с тем эти широко распространённые «крылья» физического мира вполне могут иметь отношение к проблеме возникновения живой материи. Подобный широкий подход к астробиологии, в принципе, позволяет осмысливать в новых ракурсах самые общие фундаментальные представления в «земной» биологии, а также в медико-биологических, биотехнологических и экологических направлениях науки.

Обсуждая проблему структурных и функциональных иерархий, мы столкнёмся с конкретным воплощением реализуемого природой системного принципа – использовать удачные структурные находки или какие-либо спонтанно протекающие процессы неживой природы, обращая их в подходы функции. По ходу обсуждения заметим, что иерархичность является

непременным атрибутом всех биологических систем, поскольку позволяет сочетать разномасштабные процессы в пространстве и времени, сопрягая их в различных жизненных процессах.

Характерная для современного естествознания конвергенция наук всё более переходит из стадии заимствования ими методов и подходов к этапу использования фундаментальных принципов. Настоящая глава не является обзором материалов по затронутой в её названии проблеме, но отражает представления автора и его коллег по некоторому обобщённому направлению в теоретической биофизике – «симметрии как системный подход к живому» [1–4]. Приведённые в качестве эпиграфов высказывания классиков составили физическую подоплёку излагаемого материала.

### **К представлениям о симметрии как фундаментальном физическом направлении в изучении живых систем**

Широко известны проявления симметрии у растений и животных, но речь пойдёт не о них, а о базовых подходах. От восприятия симметрий как проявлений физических закономерностей и особенностей их математического описания научный мир превратил идеи симметрии и её нарушений в фундаментальную основу теоретической физики. Наиболее известный пример – связь симметрий и законов сохранения. Столь же естественно считать представления о симметрии и нарушениях симметрии фундаментальным фактором при рассмотрении физических основ строения живых систем, их происхождения и эволюции.

Предельно упрощая живые системы, как это делается в физике, мы можем в них выделить две главные асимметрии: хиральную – молекулярную и ионную – клеточную. Обе они, являясь физическими (физико-химическими) по существу, имеют фундаментальное биологическое значение. Хиральная асимметрия определяет специфичность взаимодействий биологических макромолекул и иерархичность их структур, ионная асимметрия определяет термодинамическое неравновесие элементарных биологических систем – живых клеток [1–4].

Хиральная асимметрия обусловлена гомохиральностью органических молекул, составляющих первичные структуры биологических макромолекул. Общеизвестно, что неразветвленная полипептидная цепь белков – их первичная структура – сформирована последовательностью левых L-аминокислот, а в полимерные цепи нуклеиновых кислот РНК и ДНК включены цепочки D-рибозы и D-дезоксирибозы [5, 6]. Все основные углеводы, структурные и включенные в метаболические цепи, правые. Мембраны клеток составлены также гомохиральными семействами (фосфо)липидов.

Ионная асимметрия клеток выражается в том, что все клетки с затратой энергии накапливают катионы калия из внешней среды (морская вода, кровь многоклеточных), которая содержит большее количество катионов

натрия. То же характерно и для двухвалентных катионов: кальций накапливается клетками из среды, обогащенной магнием.

Отмечено удивительное энергетическое соответствие двух разномасштабных фундаментальных асимметрий. Для усреднённой по основным характеристикам условной животной клетки её энергетические затраты на создание натрий-калиевой и магний-кальциевой ионных асимметрий между цитоплазмой и средой составляют примерно  $6 \cdot 10^{-13}$  Дж. Примерно такая же суммарная энергетическая стоимость хиральной чистоты белков, нуклеиновых кислот и углеводов, формирующих структуры клеток. Важно отметить, что обе указанные асимметрии термодинамически неравновесны, хотя кинетически заторможены: концентрации ионов внутри и снаружи клетки стремятся выровняться, а гомохиральные мономеры, составляющие биополимеры стремятся выровнять соотношение L и D мономеров, то есть превратиться в рацемат.

По всей вероятности, гомохиральность биополимеров не является случайностью в эволюционном процессе, а является важным инструментом биологической эволюции. Симметрические (хиральные) характеристики упорядоченности структуры системы на одном её уровне определяют её масштаб и симметрические (хиральные) характеристики на следующем иерархическом уровне. В свою очередь, «хиральная чистота биосферы» (биополимеров) состоит не в исключении энантиомеров какого-либо знака из эволюционного процесса, а в разведении их по иерархическим уровням и функциям (L-аминокислоты вовлечены в структуры белков, D-аминокислоты – в регуляторные системы).

Одно из соображений, ранее высказанное авторами, состоит в том, что бифуркация, выделившая на Земле живую природу и направившая ее на путь коэволюции с неживой природой, стартовала с кооперативного формирования двух базовых сопряжённых асимметрий – хиральной (молекулярной) и ионной (клеточной). Две эти асимметрии, будучи для биологических систем энергетически и информационно значимыми, составили первичную основу биологических иерархий, определивших формирование одноклеточных и многоклеточных организмов, биоразнообразие, и, тем самым, траекторию эволюции биосферы. Исходя из этого соображения, можно полагать, что комплекс элементарных физико-химических актов, сформировавших эти асимметрии, был единым, как и предполагаемый реактор – поверхностная плёнка морской воды.

Существует значительное количество гипотез относительно сценариев возникновения предшественников живых клеток, возникновения ионной асимметрии и гомохиральности биомакромолекул [7, 8]. Мы же целенаправленно рассмотрим разработанную нами и экспериментально подтверждаемую гипотезу [1–4].

## **Поверхностная «холодная» плёнка морской воды как природный реактор.**

### **Фракционирование ионов и формирование протоклеток**

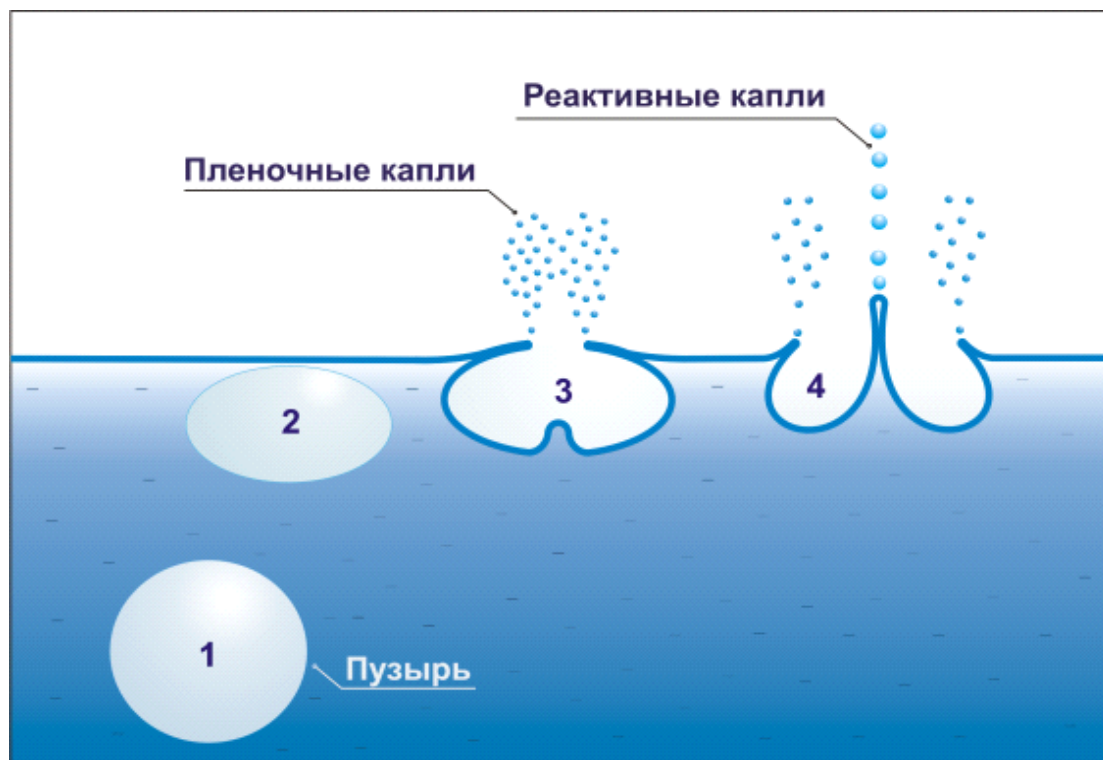
При испарении воды в поверхностном слое морской воды возникает температурный градиент – «холодная пленка» – неравновесная диссипативная структура. Обычная морская вода содержит преимущественно ионы натрия, ионов калия примерно на порядок меньше. То же самое по отношению к двухвалентным катионам магния и кальция. Такой инверсией ионных концентраций определяется запас свободной энергии, вследствие которого живые клетки становятся термодинамически неравновесными образованиями. В поверхностной микроплёнке в градиенте температуры ( $\sim 0,5^\circ$  на 50 мкм) происходят процессы термодиффузии и конвективного переноса. Возникают также электрокинетические эффекты. Более тяжелые ионы калия и кальция концентрируются в холодной зоне у поверхности воды. Количественные данные приведены в нашей работе [4].

Инвертированный ионный состав холодной поверхностной пленки сохраняется и в аэрозоле, образующемся при разрыве пузырьков воздуха у поверхности морской воды (рис. 1). Когда поверхностная пленка пузыря разрушается, образуются пленочные микробрызги. По стенкам пузыря вниз бежит ударная волна и выбивает с его дна вверх реактивную струю, которая разрывается с образованием реактивных капель. Эти капли довольно крупные и относительно тяжелые, поэтому, как правило, они падают обратно в воду. Пленочные микробрызги обогащены калием и кальцием и имеют размеры, сравнимые с клеточными (3–10 мкм). Часть их испаряется и участвует в формировании морских аэрозолей и облаков, другая часть падает обратно в воду. Коэффициенты фракционирования ионов в микробрызгах зависят от степени неравновесности системы океан–атмосфера: чем больше поток тепла «на испарение», рассчитываемый по разности температур между раствором и воздухом, тем больше коэффициент фракционирования ионов. В условиях термодинамического равновесия (при отсутствии испарения воды) холодная пленка не образуется, и эффектов фракционирования не наблюдается. Описываемые эффекты принципиальным образом отличаются от адсорбционных явлений на границах раздела фаз.

Таким образом, плёночные микробрызги имеют ионный состав, характерный для цитоплазмы живых клеток и инвертированный по отношению к морской воде.

Если поверхность моря покрыта разреженным монослоем амфифильных молекул, например, липидов, образовавшихся абиогенно, то при разрушении воздушных пузырьков пленочные капли, в отличие от реактивных, также будут покрыты монослоем тех же молекул. Пока капли находятся в воздухе, они будут терять воду из-за ее испарения, размеры капель будут уменьшаться, а монослой амфифила уплотняться до тех пор, пока не

станет достаточно плотным, чтобы испарение воды сильно замедлилось. Если такая, покрытая плотным монослоем липида капля упадет на поверхность моря, она не утонет сразу, поскольку имеет сильно гидрофобную поверхность, и будет находиться на поверхности раствора, пока не покроется



**Механизм образования аэрозоля при барботировании поверхности раствора. 1-4 последовательные стадии разрушения пузырька на поверхности**

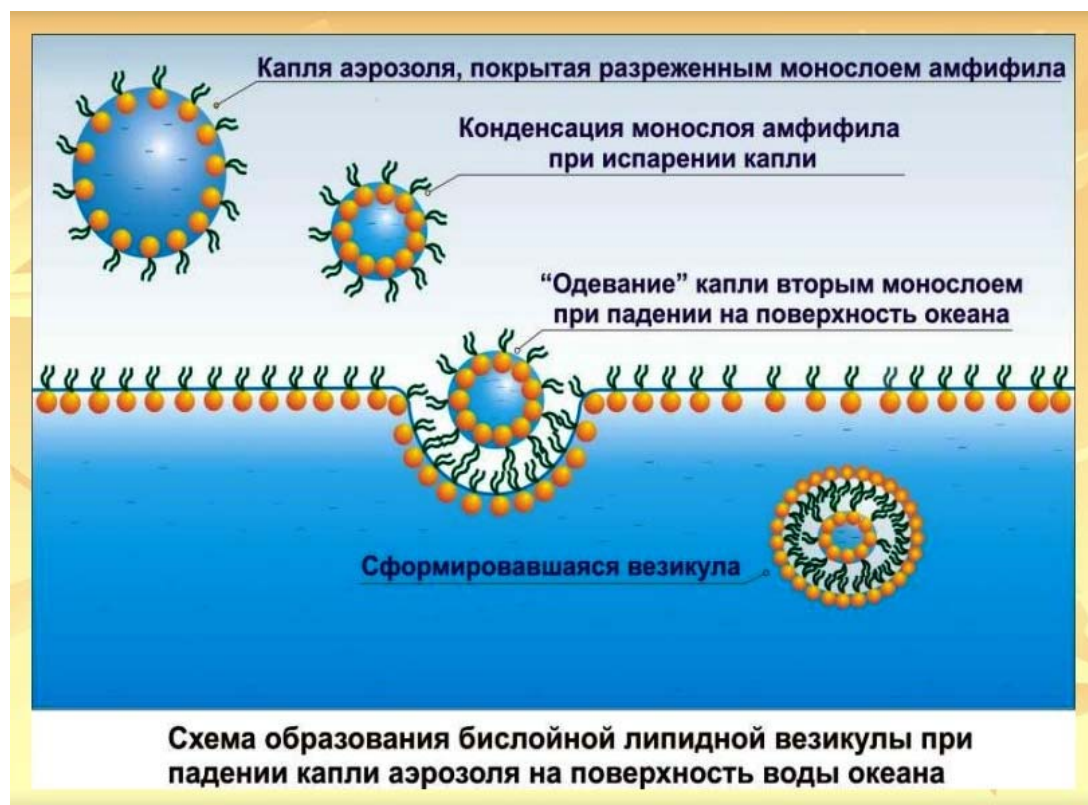
**Рис. 1.** Образование пленочных микробрызг при разрушении воздушных пузырьков на поверхности морской воды. Микробрызги содержат катионы морской воды поверхностной микроплёнки в концентрациях, имеющих обратное соотношение по отношению к объёмной фазе (повышенное содержание калия и кальция) [4].

вторым слоем амфифила, обращенным гидрофильной стороной в раствор. Идет процесс самосборки, формируется везикула, покрытая плотным биослоем амфифила и имеющая размеры небольшой клетки (рис. 2).

Нами экспериментально показано, что при наличии на поверхности раствора разреженного монослоя фосфолипидов, разрыв на ней пузырьков воздуха приводит к образованию липидных везикул, захватывающих раствор из поверхностного слоя, обогащенный ионами калия и кальция, а также L-аминокислотами. Подобные образования могут рассматриваться как прототипы клеток, способные служить объектами отбора в процессе уже биологической эволюции.

В современной биосфере возникшая подобным образом (или каким-либо другим способом) ионная асимметрия в клетках поддерживается ионными насосами мембран, затрачивающими на её поддержание энергию

гидролиза АТФ. С ионной асимметрией клетки получили возможность использовать термодинамическое неравновесие для сопряженного переноса через плазматические мембраны внутрь клеток и наружу множества веществ, участников процессов метаболизма и биосинтеза. А также явление возбудимости.



**Рис. 2.** Возникновение везикулы, прототипа клетки, характеризующейся обратным соотношением ионов калия и натрия, а также магния и кальция, по отношению к морской воде, на её поверхности, покрытой монослоем липидов [4].

В этом разделе мы говорили о натрий-калиевых и магний-кальциевых градиентах. Существует ещё одна, столь же древняя и столь же важная ионная асимметрия: неравновесные разницы в концентрации протонов между протоплазмой и органеллами растительных клеток (хлоропласты) и животных клеток (митохондрии) служат источником энергии для синтеза АТФ или органических соединений.

Итак, здесь была представлена одна из двух основных фундаментальных биологических асимметрий – ионная.

Аминокислоты, будучи амфифилами, образуют монослой на поверхности раствора и вполне возможно, что в таком монослое образуются участки из чистых энантиомеров – двумерные квазикристаллические структуры. Поэтому фракционирование энантиомеров аминокислот может состоять не в небольшом избытке одного из энантиомеров в гомогенной смеси, а в небольшом локальном преобладании хирально чистых кластеров одного из энантиомеров на поверхности раствора.

Эксперименты по проверке возможности фракционирования энантиомеров аминокислот на границе раздела океан-атмосфера были проведены нами в лабораторных условиях. При использовании концентрированных (10 г/л) водных растворов рацематов аминокислот (валина, глутамина и лейцина) микробрызги, образующиеся при разрушении воздушных пузырьков и захватывающие раствор из поверхностного слоя толщиной 50–300 мкм, обогащались L-энантиомером аминокислот.

Что касается механизма фракционирования энантиомеров аминокислот, то самые общие соображения о разделении хиральных молекул в комбинированных гравитационных, магнитных, электрических полях в сочетании с конвекцией приведены в работах В.И. Гольданского, В.А. Аветисова и В.В. Кузьмина [8]. Ими было отмечено, что для некоторого разделения смеси энантиомеров достаточно воздействия некоторых физических факторов, например, циркулярно поляризованного света или комбинации конвекции с постоянным магнитным полем плюс постоянное электрическое или гравитационное поле. Возможно действие комбинации постоянного магнитного поля и линейно поляризованного света. Поскольку наши эксперименты проводились в темноте, действие света можно не учитывать. Однако постоянное электрическое поле на границе раздела фаз всегда существует, как и постоянное магнитное поле. При испарении воды возникают конвекционные потоки. Таким образом, необходимый набор дифференцирующих хиральные молекулы физических факторов на границе океан–атмосфера имеется.

Дальнейшая дискриминация энантиомеров может быть связана с неодинаковой кинетикой образования гомохиральных и гетерохиральных пар или кластеров. Относительное обогащение микробрызг L-энантиомером достигало 5–10% (для валина и лейцина), чего заведомо достаточно для физико-химической и далее биологической эволюционной реализации преимущества одного из энантиомеров. Подчеркнем еще раз, что в равновесных условиях, когда нет испарения воды с поверхности, нет фракционирования ни ионов, ни энантиомеров аминокислот.

### **Молекулярная биология как периодическая система знакопеременных хиральных структур**

Особое место в категории симметрий–асимметрий занимает понятие хиральности. В нашем рассмотрении молекулярно-биологических систем мы будем пользоваться классическим определением хиральности: хиральность – свойство молекулы или объекта быть несовместимым со своим зеркальным отображением при любых комбинациях перемещений и вращений в трёхмерном пространстве. В энантиомере (энантиоморфе) отсутствует симметрия относительно сторон и осевая симметрия.

Известно, что гомохиральность входящих в белки «левых» L-аминокислот обеспечивает стереоспецифичность комплементарных вза-

имодействий и минимизирует объём информации, необходимый для однозначного кодирования нуклеиновыми кислотами аминокислотных последовательностей. Также известно, что дезоксирибоза и рибоза, входящие в состав уникальных ДНК и РНК, являются «правыми» D-изомерами.

Хиральность мономеров, составляющих основу информационно детерминированных биополимеров, белков и нуклеиновых кислот, обычно воспринимается как иррациональный эпизод в целесообразном эволюционном процессе, как «плата» за уникальную способность углерода образовывать огромное количество неорганических и органических соединений, гармонично связывающих в единое целое структуры и функции живых систем. А гомохиральность первичных структур воспринимается как тривиальный выход из дуалистической ситуации.

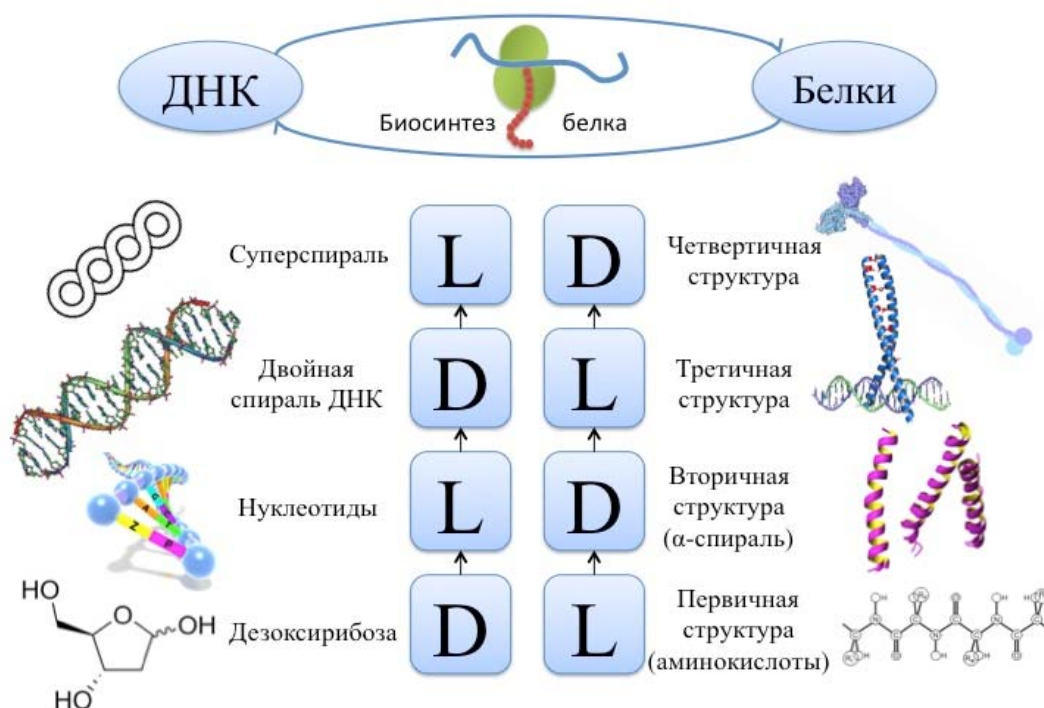
Мы высказываем принципиально иную точку зрения на проблему хиральности: хиральный дуализм является фундаментальной основой структурообразования в молекулярной биологии, а хиральность названных соединений – аминокислот, рибозы и дезоксирибозы – есть важнейший инструмент иерархической стратификации внутримолекулярных и надмолекулярных структурных уровней, а также специфичности взаимодействий между макромолекулами одинаковых и разных классов.

В макромолекулярных системах нуклеиновых кислот и белков нами впервые были выделены как целое, как хиральные инварианты молекулярной биологии знакопеременные иерархии хиральных структур в последовательностях от «нижнего» ассиметричного атома углерода в  $sp^3$ -гибридизации до суперспиралей и надмолекулярных структур. Отмечено чередование знака хиральности D-L-D-L при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации ДНК. Две базовые первичные полимерные цепочки ДНК составлены молекулами D-дезоксирибозы. Цепочки соединены нуклеиновыми основаниями в «левой» гош-конформации, а все вместе они образуют известную «правую» двойную спираль ДНК. У бактерий кольцевая «правая» спираль скручивается в «левую» суперспираль.

У белков первичная цепочка аминокислот – «левая». Образую вторичные структуры, они скручиваются в «правые»  $\alpha$ -спирали, которые, в свою очередь, сворачиваются в букеты «левых» суперспиралей. Четвертичные структуры белков, собирающиеся уже из самостоятельных молекул, снова образуют «правые» витые конструкции. У белков последовательность смены знака хиральности в структурно-функциональной иерархии: L-D-L-D.

Посмотрев на рисунок, мы можем убедиться, что центральный блок всей молекулярной биологии, представленный знакопеременными хиральными иерархиями внутри- и надмолекулярных структур ДНК и белков, образует периодическую таблицу. Вследствие смещения столбцов на полпериода, это «ядро» молекулярной биологии обретает ось симметрии и становится ахиральным блоком. Таким образом, ядро молекулярной биологии

описывается симметрически замкнутой знакопеременной хиральной периодической системой. Эта периодическая система является ахиральным инвариантом, составленным из «правых» и «левых» хиральных элементов, универсальным для всех форм живого на Земле.



**Рис. 3.** Периодическая таблица знакопеременных иерархий хиральных (спиральных) структур от первичной до четвертичной для ДНК (левая колонка) и белков (правая колонка): L – левая конфигурация энантиомера или спирали, D – правая [1].

Формирование знакопеременных хиральных иерархий в макромолекулярных структурах обусловлено четкой физической причиной – стремлением системы понизить исходный уровень свободной энергии, образующийся при энергозависимом отборе гомохиральных мономеров первичных структур макромолекул из их рацемических смесей. Заметим, что в неживой природе имеется множество примеров спонтанного формирования подобных иерархий и что живая природа успешно адаптировала этот принцип [1].

Отметим, сославшись на наши предыдущие публикации, что описанная для белков и нуклеиновых кислот спонтанно формирующаяся знакопеременная хиральная иерархия не является удачным изобретением живой природы – она свойственна механическим, гидродинамическим, жидкокристаллическим, различным биомиметическим и пр. системам [1, 9].

Знакопеременная хиральная иерархичность сопряженных уровней структур в макромолекулах имеет общебиологическую значимость: обуславливает дискретность этих уровней, служит инструментом простран-

ственной самоорганизации (уникальной самосборки – фолдинга), структурной основой «выделенных механических» степеней свободы в конструкциях биологических макромолекулярных машин.

### **Машины, молекулярные машины, фолдинг**

Если главным биологическим признаком известных нам земных форм жизни можно считать клетку, то главным физическим признаком жизни следует считать «машину». В неживой природе машин не существует, там есть только преобразователи энергии или вещества, которые, в принципе, не могут совершать «полезную работу», понятие которой появляется лишь с появлением жизни.

Машиной, молекулярной машиной можно назвать устройство (конструкцию), которое способно в циклическом режиме преобразовывать форму энергии (вещества, информации), совершая «полезную» работу, благодаря наличию «выделенных механических степеней свободы» (поступательных, вращательных), кинетически разделяющих работу и диссипацию. Эти устройства являются закрепленными эволюцией элементами активных сред, обладающими памятью о своей конструкции. Понижая степень симметрии системы, машины совершают полезную работу (так, изотропное давление пара в котле паровоза преобразуется в векторное поступательное движение, изотропная свободная энергия АТФ превращается в направленное перемещение молекул в мышцах). В зависимости от функции биологической макромолекулы ее жесткий каркас может быть и фермой, и механическим остовом машины [3]. Цикличность и хиральность в природных процессах не обязательно связаны, но при образовании живых систем они с необходимостью сопряглись в (молекулярных) машинах. Цикличность во времени и хиральность в пространстве появляются в понятиях автоволны в активных средах и объединяются в понятии «машины». Вместе они определяют направление движения в цикле, так как хиральные элементы воспринимают сигнал по его полярности. Для реализации цикличности как принципиальной временной характеристики «машина» предполагает обязательное наличие симметрий в конструкции, а для движения по контуру цикла в «правильном» направлении – несимметричность элемента, обладающего свойствами «вентиля» или «защелки». Например, храпового механизма. Любая машина иерархична, хотя бы уже потому, что в ней есть управляющие и исполнительные элементы структуры, связанные обратными связями. Особенность циклической работы молекулярных машин – кооперативное участие вторичных, третичных (при наличии надмолекулярных комплексов – четвертичных) макромолекулярных структур.

Ранее нами была сформулирована новая синергетическая закономерность, которая, как нам представляется, имеет достаточно общий физико-химический и биологический характер [1]. Эволюционирующая система,

обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, способна в процессе самоорганизации изменять тип симметрии внутри одного иерархического уровня, повышая свою «сложность», а при переходе на более высокий уровень – изменять масштаб и знак хиральности со сменой функциональной роли энантиомера. В этих публикациях нами приведены примеры хиральных систем из неживой природы, демонстрирующие образование иерархий с перемежающимся знаком хиральности. На этом принципе базируются описанные выше эффекты иерархического структурообразования в белках и ДНК: гомохиральность мономеров в первичной структуре нуклеиновых кислот и белков позволяет реализовать принцип, развитию которого посвящена статья: в иерархию макромолекулярных структур вмонтирован принцип разделения уровней, и механизм стратификации базируется на смене знака хиральности.

Известен парадокс, сформулированный в 1968 году Сайрусом Левинталем: «Промежуток времени, за который полипептид приходит к своему скрученному состоянию, на много порядков меньше, чем если бы полипептид просто перебирал все возможные конфигурации» [3, 5, 6, 10]. Этот же термин относят и к проблеме свертывания нуклеиновых кислот. Объяснение этого парадокса связывают с предположением о существовании воронки в конфигурационном пространстве на поверхности потенциальной энергии со сложным ландшафтом, которая втягивает процесс сворачивания полипептидной цепи в нативную конформацию. Предполагается, что эта воронка, характеризующаяся минимумом свободной энергии, задает направление траектории фолдинга в конфигурационном пространстве макромолекулы, проходящей через цепочку локальных минимумов энергии. Однако этот образ не наполнен физическим содержанием, принцип не конкретизирован механизмом. Мы предполагаем, что обнаруженные нами знакопеременные хиральные комплементарные друг к другу последовательности структурных уровней D–L–D–L и L–D–L–D для ДНК и белков образуют ту самую «нить Ариадны», которая направляет фолдинг макромолекул по необходимой траектории в ловушку Левинталя. Термодинамические обоснования состоят в следующем. Известно, что гомохиральная молекулярная субстанция, будь то раствор аминокислот или углеводов, подвергается рацемизации, стремясь уравнять концентрации энантиомеров, повышая до максимума энтропию системы и понижая уровень ее свободной энергии. Вместе с тем для линейного гомохирального полимера имеется принципиальная возможность понизить свою свободную энергию не только за счет рацемизации мономеров (назовем это «горизонтальной» рацемизацией), но и за счет «вертикальной» рацемизации: за счет создания структур высшего уровня с другим знаком хиральности. В данном рассмотрении в качестве частиц в системе выступают не сами молекулы, а «правые» и «левые» структурные единицы разного уровня организации. Таким образом, система «размазывает» свою гомохиральность, понижая

свободную энергию, и это сопровождается появлением у части или всех макромолекул более устойчивого (стабильного, долгоживущего, жесткого) каркаса, нежели в исходном состоянии.

С этой точки зрения, участие хиральных соединений на основе углерода в построении фундамента “живого” представляется абсолютно не случайным. Спонтанно возникшие простейшие углеродистые соединения формировали гомохиральные линейные полимеры и затем включались в связанные обратными связями иерархические конструкции, придававшие устойчивость отдельным элементам. Можно предположить, что молекулярные и надмолекулярные спиральные структуры не только служат для молекулярных машин жесткими конструкциями, позволяющими реализовать «выделенные механические» поступательные степени свободы, но и становятся теми вентильными устройствами, которые обуславливают однонаправленное движение по циклу для молекулярных машин, реализуя теперь уже вращательные степени свободы. По всей видимости, именно по этой причине мы отмечаем обилие спиральных структур разного уровня, характерное для макромолекулярных энергопреобразующих устройств, ответственных за процессы биологической подвижности в клетках или же за транспортные процессы в мембранах. Можно провести определённую физическую аналогию между понятиями спина и хиральностью: спин определяет механическую упругость атомов и молекул, а хиральность – упругость макромолекул. В целом же нам представляется, что всеобщность хиральных образований во Вселенной, начиная от мира элементарных частиц, понятия спина и явлений мегамира, отражает фундаментальные дуалистические принципы организации материи в мире как неживой, так и живой природы.

### **Некоторые выводы**

Подводя итоги, можно сказать, что в поисках проявлений жизни во Вселенной, мы должны, в первую очередь, учитывать возможность системного формирования на далёких планетах живой материи, а не разрозненного образования где-либо и каких-либо известных нам химических веществ или морфологических форм. Развиваемый нами подход, связанный с анализом фундаментальных симметрий, есть лишь одно из направлений астробиофизики, которое представляется нам достаточно общим и перспективным.

Можно полагать, что принципы, на которых базируется Жизнь во Вселенной, едины, механизмы – подобны, а число форм проявлений живого – не ограничено.

Автор благодарит своих коллег и друзей Л.В. Яковенко, А.Э. Сидорову, Е.В. Малышко, С.А. Ильченко, В.Д. Скуриду, О.А. Жулябину, С.В. Стомбуна, М.С. Попцову, Е.Ю. Симоненко, А.Н. Заикина за помощь в работе.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00029).

### Литература

1. *Твердислов В.А.* Хиральность как первичный переключатель иерархических уровней в молекулярно-биологических системах // *Биофизика*, 2013, т. 58, № 1, с. 159–164.
2. *Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В.* От симметрий – к законам эволюции. 1. Хиральность как инструмент стратификации активных сред // *Биофизика*, 2012, т. 57, вып. 1, с. 146–154
3. *Твердислов В.А., Малышко Е.В., Ильченко С.А.* // *Известия РАН. Серия физическая*, 2015, т. 79 (3), 1728.
4. *Твердислов В.А., Яковенко Л.В., Ивлиева А.А., Твердислова И.Л.* // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*, 2011, № 2, 3.
5. *Уэй Т.* Физические основы молекулярной биологии (пер. с англ., Долгопрудный: Издат. дом “Интеллект”, 2010.)
6. *Финкельштейн А.В., Птицын О.Б.* Физика белка: Курс лекций. 3е изд., испр. и доп. – М.: КДУ, 2005.
7. *Никитин М.* Происхождение жизни. От туманности до клетки / М.: Альпина нон-фикшн, 2016. – 542 с.
8. *Гольданский В.И., Кузьмин В.В.* // *Успехи физ. наук*, 1989, **157** (1), 3.
9. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Твердислов В.А.* Экспериментальное наблюдение синергетической закономерности смены знака хиральности в иерархиях биомиметических структур // *Биофизика*, 2014, т. 59, вып. 6, с. 1079–1084.
10. *Levinthal C.* Proc. meeting held at Allerton House, Monticello, Illinois (Eds J.T.P. DeBrunner, E. Munck, University of Illinois. 1969).

## Chapter 21

### ALL THINGS ALIVE. FROM PRINCIPLES TO MECHANISMS

© **V.A. Tverdislov**

*Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Symmetry and asymmetry are designated as fundamental factors of origin and development of life. It noted the primacy of physical criteria in biological evolution. The hypothesis about spontaneous generation of the living cell predecessors on the ocean surface during prebiological evolution is further developed. It is shown that physico-chemical properties of the non-equilibrium ocean-atmosphere boundary including ionic asymmetry, fractionation of enantiomers of amino- and nucleic acids, and formation of sealed vesicles provide conditions under which the spontaneous generation seems quite possible. A new kind of regularity is discovered in formation of hierarchical structures of chiral molecular biological systems. Formation of (spiral) structures with alternating chirality functions as the instrument of the systems stratification. Special attention is paid to emergence of chiral patterns in active media and to alternating chiral hierarchies in the structures of molecular machines – proteins and nucleic acids.

## *Глава 22*

### **РАННЯЯ ЗЕМЛЯ: ЛАВОВЫЕ ПОТОКИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЖИЗНИ**

© **М.М. Астафьева**

*Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской Академии наук,  
Москва, Россия,*

На самых ранних этапах развития Земли, в архее, большая часть Земли была расплавленной из-за активного вулканизма и интенсивной метеоритной бомбардировки, которая закончилась около 4.0 млрд. лет тому назад. Прекращение или ослабление космических бомбардировок позволило планете остыть и образовать твердую земную кору. Соответственно самые ранние породы Земли были вулканогенными, метаморфические и осадочные породы были образованы позднее (древнейшие метаосадочные породы имеют возраст 3.7–3.85 млрд. лет). Таким образом, вопрос колонизации лав на самых ранних этапах эволюции жизни на Земле имеет колоссальное значение. Для изучения колонизации микроорганизмами остывающих пиллоу-лав было выбрано несколько модельных объектов: среди них нижнепротерозойские пиллоу-лавы Карелии (2.41 и 2.0 млрд. лет) и Южной Африки (2.22 млрд. лет).

Вулканические<sup>1</sup>, или вулканогенные породы довольно широко распространены на поверхности современной Земли (как на суше, так и в океанах). Их пространственное распространение целиком определяется расположением вулканов [1].

Освоение и преобразование вулканических пород микроорганизмами интересует и микробиологов, и геологов. Сейчас широко обсуждается развитие жизни в вулканогенных породах далекого прошлого и современности. Вулканические породы способны поддерживать разнообразные микробные сообщества, которые обитают вдоль поверхностей, трещин и разломов. Микроорганизмы живут во влажных трещинах вулканогенных пород и оставляют свидетельства их существования как отпечатки в породе или как химические остатки их жизнедеятельности.

---

<sup>1</sup> Вулканические горные породы это один из классов магматических пород, являющиеся продуктами кристаллизации магмы (лавы), вышедшей на земную поверхность по вулканическим каналам и застывшей в течение короткого промежутка времени. Когда жидкий магматический расплав достигает земной поверхности, происходит его извержение, характер которого определяется составом расплава, его температурой, давлением, концентрацией летучих компонентов и другими параметрами. При подводных и подледных извержениях (как правило, при небольшой скорости излияния) образуются пиллоу-лавы, или подушечные лавы, вероятно, самый распространённый тип застывшей лавы на Земле [13]. Потоки пиллоу-лав формируются на склонах подводных вулканов (рис. 1). Особенно часто пиллоу-лавы образуются в океанических рифтовых зонах.

Вопрос освоения лавовых потоков микроорганизмами интересен сам по себе, вопрос же колонизации лав на самых ранних этапах эволюции жизни на Земле имеет колоссальное значение.

На самых ранних этапах развития Земли, в архее, большая часть Земли была расплавленной из-за активного вулканизма и интенсивной метеоритной бомбардировки, которая закончилась около 4.0 млрд. лет тому назад. Прекращение или ослабление космических бомбардировок позволило планете остыть и образовать твердую земную кору. Именно с этого времени и начинается геологически документированная история Земли [5]. Соответственно самые ранние породы Земли были вулканогенными, метаморфические и осадочные породы были образованы позднее (древнейшие метаосадочные породы имеют возраст 3.7–3.85 млрд. лет).

Наиболее древние земные породы, в которых обнаружены биоморфные микроструктуры, – это породы архейских зеленокаменных поясов Западной Гренландии, Южной Африки и Австралии [11, 12, 15, 16, 23]. В их разрезах преобладают вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы.

Предположение, что вулканические породы являются местообитанием ранней микробной жизни, не является неожиданным. Некоторые из самых нижних ветвей древа жизни представлены термофильными микробами и существует доказательство того, что ранняя жизнь могла быть приурочена к вулканическим территориям, в том числе к гидротермальным источникам [9]. Так, например, нитчатые микрофоссилии, описанные из массивных сульфидных отложений (возраст 3.235 млрд. лет), интерпретируются как образовавшиеся в условиях подобных современным черным курильщикам [14]. Это соответствует оптимальным температурам роста термофильных бактерий (около 70°C).

Более того, было доказано, что вскоре после извержения, когда температура поверхности пород падает ниже 113°C, жизнь уже может существовать [19, 20], причем колонизация микроорганизмами происходит одновременно везде, куда может проникнуть морская вода [23]. При этом происходит микробная колонизация и поверхности субстрата и самой толщи породы. Клетки некоторых метаногенов при повышенном гидростатическом давлении способны размножаться при 122°C и давлении 20 МПа (116°C требует давления 0.4 МПа) [21].

На примере пиллоу-лав было показано, что биологические изменения стекла пиллоу-лав процесс настолько обычный и широко распространенный, что может влиять на химические реакции и продукты взаимодействия между морской водой и породой [10, 17, 18, etc.].

Фоссилизация микроорганизмов происходит крайне быстро [3, 4], поэтому обнаруженные в результате изучения интересные и довольно обильные микробные остатки представлены исключительно микрофоссилиями.

Для изучения колонизации микроорганизмами остывающих лав было выбрано несколько модельных объектов, представляющих пиллоу-лавы.

Колонизацию древних пиллоу-лав микроорганизмами мы рассматривали на примере нижнепротерозойских пиллоу-лав Карелии (2.41 и 2.0 млрд. лет) и Южной Африки (2.22 млрд. лет). Распределение микрофоссилий по зонам пиллоу-лав рассматривалось на примере пиллоу-лав суйсарской свиты нижнего протерозоя Онежской мульды Центральной Карелии (рис. 1). В качестве сравнительного материала использовались вулканические стекла из осевой части рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта (Центральная Атлантика, полигон Сьерра-Леоне).

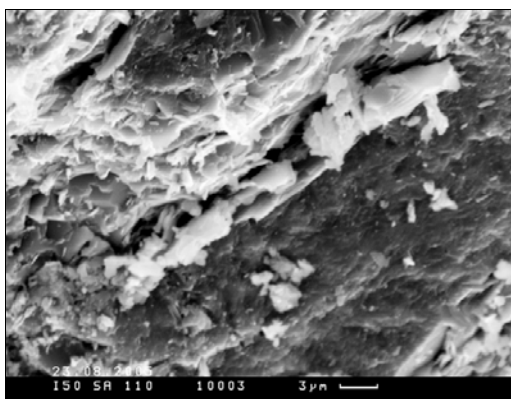


**Рис. 1.** Пиллоу-лавы суйсарской свиты нижнего протерозоя Онежской мульды Центральной Карелии. Фото Алексея Чистякова.

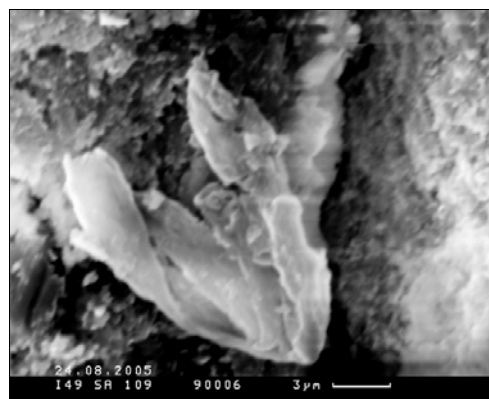
Во всех изученных пиллоу-лавах обнаружены довольно разнообразные псевдоморфозы по биогенным объектам: нитчатым, коккоидным и другим формам, а также многочисленные биопленки [2, 6–8].

Превалируют нитевидные формы, из которых наиболее важны нитевидные структуры диаметром около 5–10 мкм. По размеру и морфологии эти формы сходны с цианобактериями современных родов *Phormidium* и *Microcoleus*. Наблюдаются, вероятно, ископаемые чехлы цианобактерий с полый внутренней частью (рис. 2). Иногда это одиночные нити, практически параллельные друг другу. Однако нельзя исключить, что это несколько нитей, объединенных одним расплюснутым чехлом. Эти формы напоминают современных *Phormidium*, характерных для термальных вод. Наблюдаются также отпечатки нитей. Встречены и пучки чехлов нитей (рис. 3). Это слегка переплетающиеся и расходящиеся полые трубки, напоминающие представителей современных цианобактерий *Microcoleus*.

Можно предположить, что мы имеем в некоторых пиллоу-лавах (Онгелюк) все составляющие классического цианобактериального мата: ископаемые осцилляториевые цианобактерии (подвижные нитчатые организмы) – представители форм, напоминающих *Phormidium* и *Microcoleus*, пурпурные бактерии и фрамбоидальные структуры, связанные с процессом сульфатредукции. Застывающая базальтовая лава, контактируя с водой, могла создавать достаточно благоприятные условия для развития многослойных цианобактериальных матов, причем воды должны были содержать достаточное количество сульфатов для бактериальной сульфатредукции.

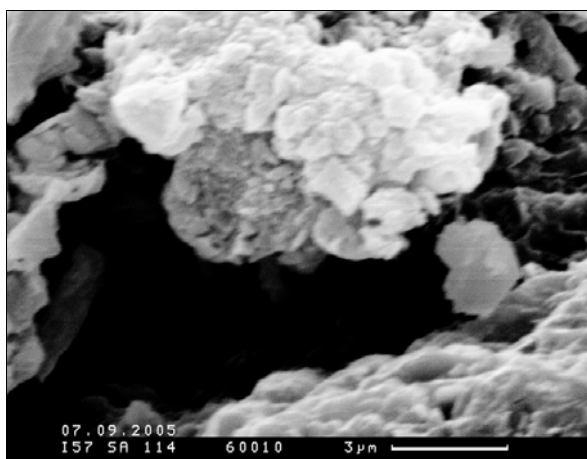


**Рис. 2.** Вероятно, ископаемые чехлы цианобактерий с полой внутренней частью (нижнепротерозойские пиллоу-лавы Онгелюк Южной Африки (2.22 млрд. лет)).



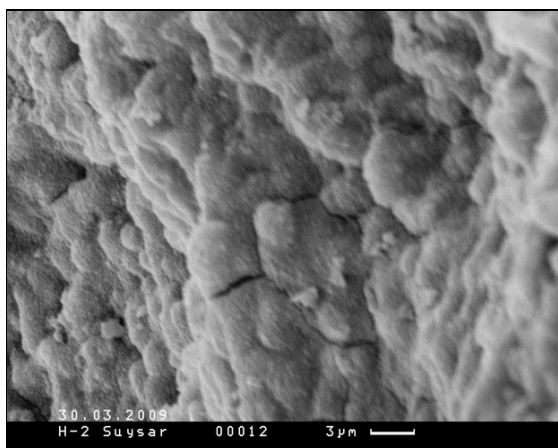
**Рис. 3.** Пучки чехлов нитей. Это слегка переплетающиеся и расходящиеся полые трубки, напоминающие представителей современных цианобактерий *Microcoleus* (нижнепротерозойские пиллоу-лавы Онгелюк Южной Африки (2.22 млрд. лет)).

Кокки встречаются реже, чем нитевидные формы. В основном это одиночные кокки (рис. 4) с шероховатой поверхностью, диаметр их, как правило, около 3–6 мкм. Колонии кокков редки. Отмечено лишь скопление кокков диаметром около 3 мкм в гликокаликсе, слагающее фрагмент породы (рис. 5).

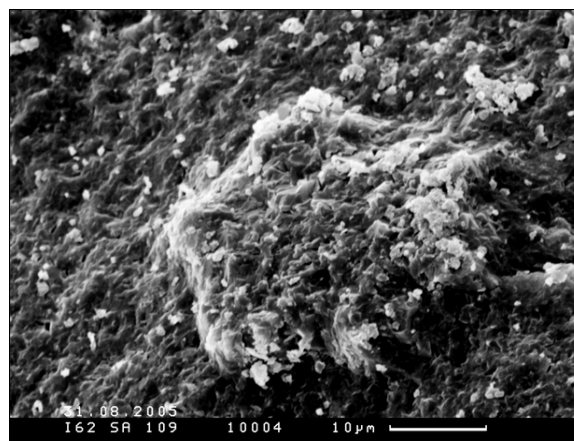


**Рис. 4.** Одиночный кокк с шероховатой поверхностью, диаметром около 3 мкм (нижнепротерозойские пиллоу-лавы Онгелюк Южной Африки (2.22 млрд. лет)).

В пиллоу-лавах встречены также формы по сложности своей организации, вероятно, приближающиеся к эвкариотам. Среди них наибольший интерес представляют крупные, по-видимому, пятиугольные структуры диаметром около 50–60 мкм (рис. 6). Углы этих структур представлены округлыми довольно крупными формами с неровной поверхностью диаметром до 15 мкм, в середине структуры также расположена округлая форма. Создается впечатление, что эти округлые формы несут на себе следы кольцевидных структур, либо обрамляющих углубления, либо, наоборот, являющиеся обломками шиповидных отростков. Можно предположить, что пятиугольные формы представляли единый организм, однако нельзя исключить, что это просто колонии, в которые объединялись округлые формы. Но в любом случае такие структуры по сложности своей организации, вероятно, приближаются к эвкариотам.



**Рис. 5.** Скопление кокков диаметром около 3 мкм в гликокаликсе, слагающее фрагмент породы (пиллоу-лавы суйсарской свиты нижнего протерозоя Онежской мульды Центральной Карелии).



**Рис. 6.** Крупная, по-видимому, пятиугольная структура диаметром около 50–60 мкм. Углы этой структуры представлены округлыми довольно крупными формами с неровной поверхностью диаметром до 15 мкм (нижнепротерозойские пиллоу-лавы Онгелюк Южной Африки (2.22 млрд. лет)).

Встречены также крупные округлые структуры диаметром около 25 мкм с неровной поверхностью и мелкими (диаметр 1–2 мкм) кратероподобными углублениями, обрамленными тонким валиком. Эти формы напоминают округлые структуры, слагающие пятиугольники, о которых шла речь выше.

В результате бактериально-палеонтологических исследований различных зон пиллоу-лав – пород из межподушечного пространства, из краевых и центральных зон – были выявлены существенные различия в распределении микрофоссилий. Главное то, что комплекс микрофоссилий межподушечного пространства и краевых частей подушек намного обильнее и разнообразнее, чем центральных частей. Распределение микрофосси-

лий в пиллоу-лавах говорит о том, что наиболее благоприятные условия для развития и процветания жизни были в осадке на поверхности пиллоу-лав, за счет которого и был сформирован межподушечный материал. Краевая часть пиллоу-лав, граничащая с осадком, также была довольно благоприятна для развития микроорганизмов [13].

Подтверждено, что микробы колонизировали базальтовое стекло раннедокембрийских подводных извержений, точно также как современные микробы колонизируют при извержениях вулканическое стекло. Как в современных, так и в раннепалеопротерозойских комплексах преобладают разнообразные нитевидные формы и встречены предположительно эвкарриотные формы. В то время как кокки и овальные формы, вероятно, имели подчиненное значение. Таким образом, вулканогенные породы являлись благоприятной средой для развития жизни.

Итак, самые ранние породы Земли были вулканогенными, остальные типы пород были образованы позднее. Вулканогенные (изверженные) породы подвергались микробной колонизации как на поверхности, так и в самой толще породы. Высокие температуры остывающей лавы не являются препятствием для развития микробной жизни. Кроме того, для существования жизни на Земле необходимо наличие воды, которая появилась около 4 млрд. лет назад. Таким образом, колонизация жизнью нашей планеты могла начаться с образованием земной коры и охлаждением ее до 113°C, а по некоторым данным микробная жизнь возможна уже при 120–130°C. Колонизация происходила по влажным трещинам и поверхностям. Вода также играла роль экрана для жесткого ультрафиолетового излучения, т.к. озоновый слой, по-видимому, отсутствовал.

### Литература

1. *Арабаджи М.С.* В недрах голубого континента – М.: Недра, 1988. 142 с.
2. *Астафьева М.М., Шарков Е.В., Чистяков А.В., Богина М.М.* Сравнительная характеристика микрофоссилий вулканических стекол в пиллоу-лавах раннего палеопротерозоя Карелии и современных вулканических стеклах из пиллоу-лав Срединно-Атлантического хребта // Проблемы эволюции биосферы. М., ПИН РАН, 2014. С. 99–118.
3. *Герасименко Л.М., Гончарова И.В., Жегалло Е.А., Заварзин Г.А., Зайцева Л.В., Орлеанский В.К., Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т.* Процесс минерализации (фосфатизации) нитчатых цианобактерий // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 2. С. 208–214.
4. *Розанов А.Ю.* Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонт. журн. 2003. № 6. С. 41–49.
5. *Розанов А.Ю.* Условия жизни на ранней Земле после 4 млрд. лет назад // Проблемы происхождения жизни. М., ПИН РАН, 2009. С. 185–202.
6. *Astafieva M.M., Rozanov A.Yu., Cornell D.H., Hoover R.B.* Development of living organisms on the lava-water interface of Palaeoproterozoic Ongeluk lavas of South Africa // Proc. SPIE, 2008. V. 7097. 709703-1 – 709703-13.
7. *Astafieva M.M., Rozanov A.Yu., Sharkov E.V., Chistyakov A.V., Bogina M.M., Hoover R.B.* Volcanic Glasses as Habitat for Microfossils: Evidence from the Early Paleoproterozoic

- zoic Pillow Lavas of Karelia and their Modern Analogues in the Mid-Atlantic Ridge // Proc. SPIE, 2009. Vol. 7441. 744104-1 – 744104-12.
8. *Astafieva M.M., Chistyakov A.A., Bogina M.M., Sharkov E.V.* Early Proterozoic Pillow Lavas of Suisari As Habitats of the Earliest Microorganisms // *Paleontol. Journ.* 2013. V. 47. № 10. P. 1110–1115.
  9. *Furnes H., Banerjee N.R., Muehlenbachs K., Staudigel H., de Wit M.* Early life recorded in Archean pillow lavas // *Science.* 2004. V. 304. P. 578–581.
  10. *Furnes H., Banerjee N.R., Staudigel H., Muehlenbachs K., McLoughlin N., de Wit M., van Kranendonk M.* Comparing petrographic signatures of bioturbation in recent to Mesoproterozoic pillow lavas: Tracing subsurface life in oceanic igneous rocks // *Precamb. Res.* 2007. V. 158. P. 156–176.
  11. *Knoll, A.H.* Neoproterozoic evolution and endoproterozoic change // *Early life on Earth.* N.Y.: Columbia Univ. Press. 1994. P. 439–449.
  12. *Knoll, A.H., Barghoorn, E.S.* Archean microfossils showing cell division from the Swaziland System of South Africa // *Science.* 1977. V. 198. P. 396–398.
  13. *Moore J.G.* Mechanism of Formation of Pillow Lava // *American Scientist.* 1975. V. 63, № 3. P. 269–277.
  14. *Rasmussen B.* Filamentous microfossils in a 3,235-million-year-old volcanogenic massive sulfide deposit // *Nature.* 2000. V. 405. P. 676–679.
  15. *Schopf J.W., eds.* Earth's biosphere, its origin and evolution. Princeton: Univ. Press. 1983. 544 p.
  16. *Schopf J.W.* Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life // *Science.* 1993. V. 260. № 5108. P. 640–646.
  17. *Staudigel H., Furnes H.* Microbial mediation of oceanic crust alteration // *Hydrogeology of the oceanic crust.* Cambridge Univ. Press, 2004. P. 606–624.
  18. *Staudigel, H., Furnes, H., Kelley, K. et al.* The oceanic crust as bioreactor, [The Subseafloor Biosphere at Mid-Ocean Ridges], *Geophys. Monogr. Am. Geophys. Union., Ser.* 144. 2004. P. 325–341.
  19. *Stetter K.O.* Hyperthermophiles in the history of life // *Phil. Trans. Roy. Soc.* 2006. V. B 361. P. 1837–1843.
  20. *Stetter K.O., Fiala G., Huber G., Seegerer A.* Hyperthermophilic microorganisms // *FEMS Microbiol. Rev.* 1990. V. 75. P. 117–124.
  21. *Takai K., Nakamura K., Toki T., Tsunogai U., Miyazaki J., Hirayama H., Nakagawa S., Nunoura N., Horikoshi K.* Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH<sub>4</sub> production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation // *PNAS.* August 5, 2008. V. 105. No. 31. P. 10949–10954.
  22. *Thorseth, I.H., Torsvik, T., Torsvik, V., Daae, F.L. and R.B. Pedersen.* “Keldysh-98 Scientific party, 2001. Diversity of life in ocean floor basalts // *Earth Planet Sci. Lett.* 2001. V. 194. P. 31–37.
  23. *Walter M.R.* Archean stromatolites: evidence of the Earth's earliest benthos. In “Earth's earliest biosphere: its origin and evolution”. Princeton Univ. Press, 1983. P. 187–213.

*Chapter 22*

**EARLY EARTH:  
LAVA FLOODS AND LIFE OPPORTUNITY**

© **M.M. Astafieva**

*Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

At the earliest stages of the Earth development, in Archean, a large part of the Earth was molten due to active volcanism and intense meteorite bombardment that ended about 4.0 GA. Stopping or weakening of the cosmic bombardment has allowed the planet to cool and form a solid crust. It is from this time geologically documented history of the Earth begins. Accordingly, the earliest Earth rocks are igneous, metamorphic and sedimentary rocks were formed later (the oldest metasedimentary rocks – 3.7–3.85 GA). Therefore, the question of microorganism colonization of lava at the earliest stages of life evolution on the Earth is of paramount importance. A few model objects were chosen for investigation of microbial colonization of getting cold lava floods. Among them Early Protherozoic pillow-lavas of Karelia (2.41 and 2.2 GA) and South Africa (2.22 GA). Modern volcanic glasses of pillow lavas of Mid-Atlantic ridge were used as comparative material.

## *Глава 23*

# **МАРСИАНСКИЕ ЭКОНИШИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА В НИХ ЖИЗНИ**

© **Н.Э. Демидов**

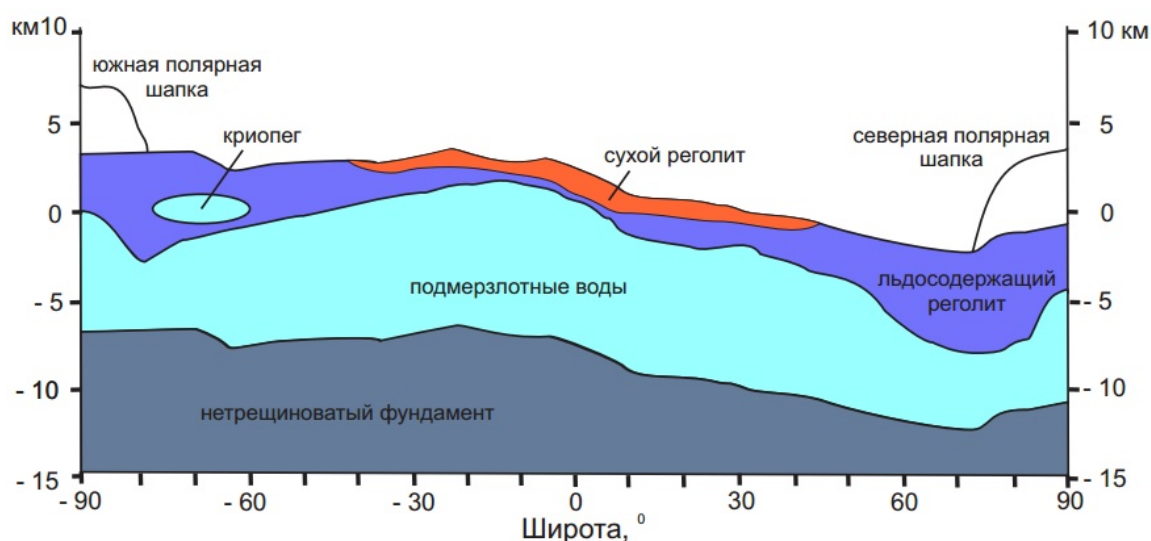
*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия*

Современный Марс по критерию наличия и фазового состава воды может быть разделен на пять основных экологических ниш: постоянные полярные шапки, сухой реголит, подмерзлотные водоносные горизонты, криопэги и льдосодержащий реголит. Главнейшими факторами, лимитирующими возможность обнаружения жизни в марсианских эконишах, являются отсутствие воды (сухой реголит), глубина залегания (криопэги и подмерзлотные водоносные горизонты), возраст (льдосодержащий реголит и полярные шапки). Сделан вывод, что приоритетными объектами для поисков жизни на Марсе являются мерзлые отложения молодых полярных вулканов, а также прослои пеплов в полярных шапках. В процессе вулканических извержений микроорганизмы из подмерзлотных водоносных горизонтов могли попасть на поверхность и сохраниться в мерзлоте или ледниках на протяжении миллионов лет, как это происходит на Земле. Нельзя также исключать наличие жизни в доселе не обнаруженных специфических местообитаниях в сухом реголите подобных антарктическим криптоэндолитам.

### **Введение**

Несмотря на отсутствие наблюдаемых признаков жизни на Марсе и отрицательный результат астробиологических экспериментов аппаратов Viking, геологические свидетельства о схожести условий на раннем Марсе и на Земле вместе с фактом обнаружения значительных запасов льда  $H_2O$  оставляют открытым вопрос о возможности существования на Марсе современных форм жизни или палеонтологических остатков. Геологическая история Марса к настоящему времени в общих чертах расшифрована, что позволяет наложить на нее возможный сценарий развития живых существ, и тем самым выявить основные события палеонтологической истории красной планеты. Второй важной геологической составляющей в проблеме поисков жизни на Марсе является выявление структурно-генетического строения верхней части его разреза, на основании которого Марс может быть разделен на экологические ниши (рис. 1, табл. 1). В качестве критерия при выделении экониш можно рассматривать наличие и фазовый состав  $H_2O$ . Будем исходить из предположения о том, что жизнь могла зародиться на раннем этапе эволюции Марса и, что марсианские организмы, как и земные, основаны на воде, а значит, обладают сходной стратегией и пределами приспособления к условиям окружающей среды. В этом случае наиболее ликвидным способом оценить приспособленность марсианских экониш для сохранения жизни и выработать методику ее поиска будет привлечение опыта изучения земных моделей-аналогов. Выбор первооче-

редных объектов для поиска жизни должен быть также скорректирован с учетом существующего уровня развития технических средств изучения, делающий не все экониши доступными для их опробования.



**Рис. 1.** Пять экологических ниш современного Марса на геологическом разрезе.

**Таблица 1.** Перспективность обнаружения жизни в эконишах Марса с точки зрения геологических и биологических факторов.

Экониши	Геологические факторы		Биологические факторы	
	Положительные	Отрицательные	Положительные	Отрицательные
Подземные воды	Единственная экониша, в которой на протяжении всей геологической истории поддерживались условия, необходимые для жизни	1. Достоверно не обнаружены 2. Недоступны для изучения	1. Наиболее благоприятные условия для развития микроорганизмов (температуры > 0°C, наличие воды в жидкой фазе) 2. Земные аналоги с высокой численностью микроорганизмов	
Льдосодержащий реголит	В районе молодых полярных вулканов могут быть обнаружены мерзлые отложения, генетически связанные с подмерзлотными водами	Большая часть многолетнемерзлых пород Марса имеет возраст на порядки больший возраста земных аналогов	1. Благоприятные условия для сохранения микроорганизмов (низкие температуры, криопротекторная роль пленок незамерзшей воды) 2. Земные аналоги	

Экониши	Геологические факторы		Биологические факторы	
	Положительные	Отрицательные	Положительные	Отрицательные
			с относительно высокой численностью жизнеспособных микроорганизмов – $10^1-10^6$ кл/г (многолетнемерзлые породы Арктики, Антарктиды и высокогорных районов)	
Сухой реголит	Доступны для изучения	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Облучение верхних 1.5 м грунта космическими лучами</li> <li>2. Отсутствие воды</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая доступность воды для микроорганизмов</li> <li>2. Наличие перхлоратов в поверхностных слоях</li> <li>3. Отрицательный результат миссии “Viking”</li> <li>4. Морозные породы на Земле не могут являться в полной мере аналогом морозных пород Марса</li> </ol>
Криопеги		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Достоверно не обнаружены</li> <li>2. Недоступны для изучения</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Известны земные аналоги населенные уникальными галофильными и психрофильными микроорганизмами</li> <li>2. Доступная для микроорганизмов вода</li> </ol>	
Полярные шапки	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Доступны для изучения</li> <li>2. Низкий уро-</li> </ol>	Образованы из атмосферного конденсата в		Чрезвычайно низкая численность микроор-

Экониши	Геологические факторы		Биологические факторы	
	Положительные	Отрицательные	Положительные	Отрицательные
	вень фоновой радиации 3. Прослойки пеплов в полярных шапках могут быть генетически связаны с подземными водами	эпоху отсутствия жизни на поверхности		ганизмов в Земных аналогах ( $0-10^2$ кл/мл в полярных шапках Антарктиды и Гренландии).

Необходимо отметить, что реализуемый в настоящей работе подход с использованием земных моделей-аналогов работает только в том случае, если речь идет о поисках форм жизни, основанных на воде. Его использование для оценки вероятности существования на Марсе не известных нам форм жизни не имеет никакого смысла. Теоретически можно рассматривать в качестве альтернативы  $H_2O$  ряд других растворителей, например,  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $HF$ ,  $H_2S$ ,  $CH_3OH$ ,  $H_2O_2$ ,  $C_2H_6$ . В случае Марса вода является самым распространенным растворителем, а относительная близость физических и геологических условий на Земле и Марсе делают воду наиболее адекватным (если не единственно возможным) растворителем, который может быть положенным в основу сложных химических систем, образующих потенциальным марсианские организмы. Кроме того, вследствие орбитального соседства Земли и Марса нельзя исключать, что жизнь на этих двух планетах имеет единый источник. На Землю она могла быть доставлена путем метеоритной транспортировки с Марса. Все эти доводы делают правомочным тезис о первоочередной необходимости поисков на Марсе форм жизни, основанных именно на воде.

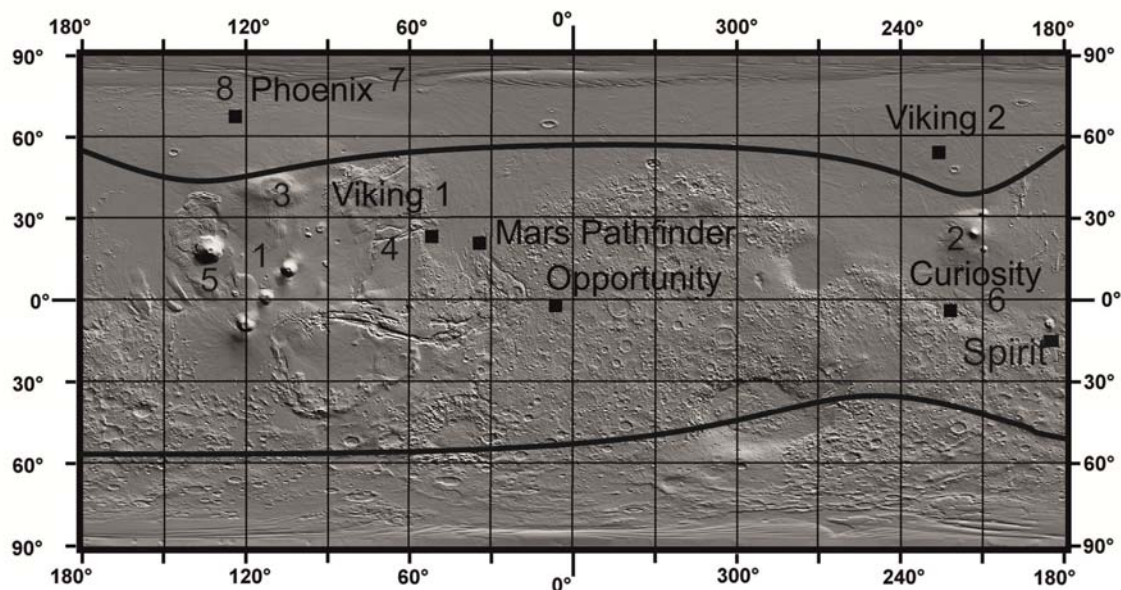
### **Астробиологический аспект этапов развития Марса**

**Ноахидский период** (4.6–3.7 млрд. лет). Согласно космогонической гипотезе, вода на планеты земной группы попала после образования Солнечной Системы, между 4.6 и 3.7 млрд. лет назад. Это эпоха интенсивной метеоритной бомбардировки Марса ледяными телами из-за “снеговой линии”, к которой он наиболее близок [Baker et al., 2005; Kasting, 2003; Ogo, 2005]. Падение астероидов и комет разогрело поверхность планеты – климат стал влажным и теплым [Kargel, 2004], способствуя формированию гидросферы. В этот период ранний Марс развивался по схожему с ранней Землей сценарию. Круговорот воды был подобен земному: в северном полушарии существовал океан, а в южном образовывались речные долины [Baker et al., 1991; Carr, 2000]. И хотя доказательств зарождения жизни на

Марсе в ноахидское время нет, близость условий на раннем Марсе с земными не исключает принципиальной возможности ее появления.

Если говорить о ранних этапах развития земной жизни, то, согласно анализу генов РНК представителей всех царств живых организмов, наиболее древними ветвями филогенетического дерева являются гипертермофильные микроорганизмы как среди бактерий, так и среди архей [Stetter, 2006]. Такие организмы адаптированы к жизни в температурном диапазоне от 80 до 120°C и не способны размножаться при более низких температурах. Это свидетельствует о том, что на ранних этапах эволюции жизнь на Земле была представлена организмами, населяющими геотермальные места обитания. И только в процессе дальнейшей эволюции при остывании Земли появились организмы, адаптированные к более холодным условиям. Если исходить из того, что наиболее древние формы жизни на Земле датируются примерно 3.5 млрд. лет, а до 4.2 млрд. лет назад наша планета представляла собой “океан” раскаленной магмы, получается, что зарождение жизни на Земле произошло достаточно быстро и заняло не более 700 млн. лет [Farmer, 1995]. Синхронность этого периода с ноахидским периодом на Марсе, когда жидкая вода существовала на поверхности, предопределяет теоретическую возможность зарождения жизни и на Марсе.

***В Гесперийский период*** (3.7–2.9 млрд. лет) на Марсе произошла глобальная климатическая перестройка. Она привела к потере плотной атмосферы, началу промерзания и формированию криосферы [Carr, 2000]. Перестали выпадать осадки в виде дождей, исчезли водоемы, прекратилось образование речных систем и формирование филосиликатов – свидетелей активного взаимодействия поверхности с водой [Vibring et al., 2006]. Падение температур ниже 0°C и беспрепятственное облучение космическими лучами привели к разрушительным для биосферы последствиям. Условия на поверхности вышли за пределы выживаемости, и микроорганизмы могли или законсервироваться в мерзлых толщах, или “отжаться” в подмерзлотные водоносные горизонты. Пространственно разобщенные, пригодные для жизни оазисы могли сохраняться за счет геотермального подогрева в результате тектоно-вулканической активности, основные этапы которой приурочены к областям Тарсис, Элизиум и патера Альба [Carr, 2006], а также при формировании марсианских каналов – гигантских долин истечения (рис. 2). Образование последних, по-видимому, связано с глобальным промерзанием, приведшим к криогенному давлению и катастрофической разгрузке подмерзлотных водоносных горизонтов на экваторе, где мощность мерзлоты была наименьшей [Carr, 2000]. В каньоне Маринера, дающем начало долине истечения Касей, сформировался комплекс отложений с сульфатами, свидетельствующими о длительном накоплении в водной среде [Vibring et al., 2006]. С прекращением эндогенной активности в оазисах, очевидно, прерывалась и возможность биологической активности, а ее потенциальные продуценты консервировались в мерзлоте.



**Рис. 2.** Карта рельефа Марса по данным лазерного высотомера MOLA с указанием обсуждаемых районов: 1 – тектоно-вулканическое поднятие Тарсис, 2 – вулкан Элизиум, 3 – патера Альба, 4 – долина Касей, 5 – вулкан Олимп, 6 – равнина Церберус, 7 – группа молодых конусов предположительно вулканического генезиса, 8 – группа молодых щитовых вулканических построек, ■ – места посадки автоматических аппаратов, — — современные границы северной и южной полярной области распространения льдо-содержащего реголита.

**Амазонийский период** (< 2.9 млрд. лет). Количество и время существования оазисов жизни на поверхности постепенно уменьшается вслед за ослабеванием эндогенной активности. К редким оазисам, существовавшим в этот период, можно отнести, например, северный склон патеры Альба, где обнаружены флювиальные формы, некоторые вулканы Тарсиса, включая Олимп, Элизиум и площадные излияния лав, сформировавшие равнину Церберус [Berman, Hartmann, 2002; Neukum et al., 2004]. Холодный и сухой климат эпизодически сменялся влажным, что выразилось в покровном оледенении южного полушария (ледниковые формы отмечены вплоть до 45° ю.ш.) и горном оледенении экваториальной зоны, в частности, вулканов Тарсиса [Carr, 2006].

### Современные экониши Марса и их земные аналоги

**Северная и южная постоянные полярные шапки.** Состоят из льда воды. Диаметр шапок 300–800 км при толщине 3–4 км. Возраст северной шапки оценивается в 100 тыс. лет, южной 7–17 млн. лет [Hvidberg, 2005]. Среднегодовая температура поверхности –115°C. Наиболее близким земным аналогом является антарктический ледник в районе станции Восток, где среднегодовая температура поверхности составляет –56°C, минимальная температура воздуха достигает –89.2°C, а возраст на подошве оценивается примерно в 1 млн. лет [Siegert et al., 2001]. Лед здесь содержит жизне-

способные микроорганизмы в количестве  $10^{1-2}$  кл/мл, попавшие сюда в основном воздушным путем [Абузов, 1993]. К факторам, благоприятствующим сохранению жизнеспособности клеток во льдах, следует отнести уровень фоновой радиации, который в них в несколько раз меньше, чем в мерзлых породах. Несмотря на это, наличие жизни в марсианских ледниках маловероятно, так как они сформированы из стерильного конденсата в позднеамазонийскую эпоху отсутствия жизни на поверхности. Температура на подошве ледников не превышает  $-50^{\circ}\text{C}$ , что исключает возможность существования на Марсе подледниковых водоемов, подобных озеру Восток в Антарктиде.

**Сухой реголит.** На Марсе залегает с поверхности повсеместно и имеет мощность от первых сантиметров на периферии постоянных полярных шапок до нескольких сотен метров на экваторе. Земным аналогом является сухой слой, перекрывающий льдонасыщенную мерзлоту в антарктических оазисах, в котором жизнь локализована в специфических местообитаниях, таких как криптоэндолиты. На Марсе сухой реголит, по-видимому, не содержит жизни в виду полного отсутствия жидкой воды.

**Подземные воды.** Залегают под мерзлыми породами и, вероятно, характеризуются высокой соленостью и бескислородными условиями. Их аналогом является глубинная биосфера земли (deep biosphere), населенная хемолитотрофами. Это единственная экониша, где жизнь могла сохраняться на протяжении всей истории Марса вне зависимости от изменений условий на поверхности [Демидов и др., 2012]. Большая глубина залегания делает их недоступными для исследования.

**Криопеги.** Отрицательнотемпературные рассолы – криопеги – можно ожидать на Марсе как внутри мерзлоты, так и под ней. В качестве их земных аналогов можно рассматривать арктические внутримерзлотные криопеги [Gilichinsky et al., 2007]. Криопеги на Марсе не доступны для изучения, так как даже предельно концентрированный рассол с температурой замерзания  $-60^{\circ}\text{C}$  может стабильно существовать здесь только на значительной глубине.

**Льдосодержащий реголит.** На высоких широтах Марса верхняя граница льдосодержащего реголита находится на глубине менее 1 м [Demidov et al., 2008], а нижняя может достигать глубин в 4–6.5 км. В экваториальной зоне его распространение возможно на глубинах от нескольких сотен метров до 2.5–3 км. Температура не превышает  $-75^{\circ}\text{C}$  на кровле мерзлых пород и возрастает с глубиной. В качестве аналогов можно рассматривать антарктические мерзлые породы, содержащие жизнеспособные клетки в количестве  $10^{5-6}$  кл/на 1 грамм сухой навески [Gilichinsky et al., 2007]. В Антарктиде мерзлые породы, из которых были выделены микроорганизмы, характеризовались среднегодовой температурой до  $-27^{\circ}\text{C}$  [Goordial et al., 2016] и возрастом  $> 5$  млн. лет.

### **Стратегия поисков жизни**

Если под мерзлотой Марса существуют водоносные горизонты, то они являют собой эконишу, где вероятность обнаружения жизни наиболее высока, что объясняется наличием воды в жидкой фазе, тепла и газов. Наличие подповерхностных горизонтов с жидкой водой на Марсе, несмотря на значительное количество косвенных признаков, до сих пор не является общепризнанным фактом, а значительная глубина залегания делает их недоступными для исследований. Тем не менее, эта экониша играет ключевую роль в стратегии поисков жизни, так как только в подмерзлотных водах на протяжении всей истории Марса вне зависимости от радикально менявшихся условий на поверхности поддерживались условия для существования жизни. Поиск жизни может быть основан на исследовании районов, где геологическая активность выносит ее из глубины. Таких процессов может быть два – вулканизм и излияния на поверхность подземных вод, объединяемых понятием гидротермальная деятельность. Если такие явления происходили в полярной зоне за последние миллионы лет, то микроорганизмы из глубинной биосферы Марса могли попасть на поверхность и криоконсервироваться в льдосодержащем реголите.

К настоящему моменту в полярных областях Марса известны два района, где в недавнем геологическом прошлом имела место гидротермальная активность – оба они расположены на периферии северной полярной шапки. Стереокамерой высокого разрешения HRSC на европейском космическом аппарате Mars Express в пределах  $79\text{--}81^\circ$  с.ш. и  $261\text{--}295^\circ$  в.д. [Neukum and Gasselt, 2006] были обнаружены формы рельефа, по морфологии сходные с молодыми шлаковыми конусами [Gilichinsky et al., 2015]. Вторую группу перспективных молодых вулканических образований в северном полярном районе представляют щитовые вулканы, впервые обнаруженные аппаратами Viking [Hodges and Moore, 1979] и более детально исследованные с помощью лазерного высотомера MOLA. Вулканы имеют размеры в поперечнике 10-60 км и координаты в пределах  $73.5\text{--}77.9$  с.ш.,  $202\text{--}293.5$  в.д, т.е. пространственно локализованы в одну область со шлаковыми конусами и вероятно имеют сходный возраст. По оценкам [Garvin et al., 2000] возраст щитовых вулканов составляет 1–20 млн. лет. Ближайшим геологическим и биологическим аналогом полярной вулканической провинции следует считать вулканические постройки в области распространения мерзлых пород на Земле, в которых присутствуют жизнеспособные термофильные бактерии [Gilichinsky et al., 2015].

Поэтому вопрос о наличии глубинной биосферы на Марсе может быть решен без глубокого бурения путем отправки марсохода или посадочной платформы с буровой установкой в один из двух выше обозначенных районов. Буровая должна осуществить бурение на глубину 2–3 м, доставить образцы в лабораторию на марсоходе, в которой на различных питательных средах происходит культивация микроорганизмов, фотофиксация ре-

зультатов и т. п. По аналогии, небольшой шанс оставляют прослой пеплов в полярных шапках, которые могли образоваться из вулканических выбросов, имевших место в последние миллионы лет. Не исключено, что вместе с выбросом пеплов и сопутствующих газов на поверхность попадали и микроорганизмы, обитающие в подмерзлотных водах.

Альтернативный сценарий для поиска жизни может быть связан со специфическими местообитаниями в сухом реголите. В Антарктиде известны сообщества цианобактерий, зеленых водорослей и лишайников – так называемые криптоэндолиты, которые располагаются в камнях в нескольких миллиметрах от поверхности, что позволяет им в течение полярного дня спрятаться от сильного ультрафиолетового излучения. В то же время зерна кварца пропускают достаточно света для фотосинтеза и кроме того – это более теплая экониша и, что самое главное, под поверхностью камня проще сохранять влагу от испарения. По аналогии с криптоэндолитами на Земле, нельзя исключать, что и на Марсе существуют до ныне не известные местообитания с организмами, которые способны использовать даже мизерные количества воды для жизнедеятельности и репарации ДНК, а в течение большей части года находиться в анабиозе и прятаться от разрушительного воздействия радиации под камнями. В качестве эпизодического источника H<sub>2</sub>O для марсианских аналогов криптоэндолитов может выступать, например, конденсат, образующийся в ночное время при сезонном перераспределении воды от одной полярной шапки к другой.

### **Заключение**

На раннем этапе истории в ноахидское время (4.6–3.7 млрд. лет назад) Марс развивался по сходному с Землей сценарию, что могло привести к зарождению жизни на раннем Марсе. Дальнейшая ее эволюция в гесперейское и амазонийское время происходила в условиях глобального промерзания. В постноахидское время на промерзшей поверхности временно могли возникать оазисы, связанные с районами активного вулканизма и местами разгрузки подземных вод, где жизнь из подмерзлотных водоносных горизонтов могла попадать на поверхность. Возможность прямой экстраполяции опыта изучения криобиосферы Земли на Марс затрудняется огромной разницей в возрасте земных и марсианских мерзлых отложений, а также тем, что формирование большей части мерзлых отложений и ледников на Марсе происходило в отрыве от подземных вод, т.е. в безжизненной среде. В качестве перспективных объектов для поисков жизни можно рассматривать молодые полярные вулканические отложения и прослой пеплов в полярных шапках. Нельзя исключать существования аналогов антарктических криптоэндолитов в сухом реголите Марса. В подземных водах потенциальные микроорганизмы будут являть собой хемолитотрофов, в мерзлоте и полярных шапках микроорганизмы находятся в состоянии криоконсервации, а в сухом слое реализуется стратегия подобная той, ко-

торию используют криптоэндолиты в Антарктиде. Для всех этих случаев предложены земные модели, применимость которых ограничена предположением о том, что марсианские формы жизни основаны на воде.

### Литература

- Демидов Н.Э., Гиличинский Д.А., Миронов В.А., Шмакова Л.А. Криобиосфера Земли и поиск жизни на Марсе // Криосфера Земли, 2012, т. 16, № 4, с. 67–82.
- *Abyzov S.S.* ‘Microorganisms in the Antarctic Ice’ from *Antarctic Microbiology*. *Friedmann E.I.* (ed). Wiley-Liss inc, New York, 1993.
- *Baker V.R., Strom R.G., Gulick V.C. et al.* Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars // *Nature*, 1991, vol. 352, p. 589–594.
- *Baker L., Franchi I.A., Wright I.P.* The Origins of Martian Water: What we can learn from meteorites // chapter in *Water on Mars and Life*. Berlin: Springer. 2005. p. 3–24.
- *Berman D.C., Hartmann W.K.* Recent fluvial, volcanic, and tectonic activity on the Cerberus plains of Mars // *Icarus*, 2002, vol. 159, № 1, p. 1–17.
- *Bibring J.P., Langevin Y., Gendrin A., Gondet B., Poulet F., Berthe M., Soufflot A., Arvidsson R., Mangold N., Mustard J., Drossart P., the OMEGA team.* Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations // *Science*, 2005, v. 307, p. 1576–1581.
- *Carr M.H.* Martian oceans, valleys and climate // *Astronomy and Geophysics*, 2000, vol. 41, № 3, p. 3.20-23.26.
- *Carr M.H.* The surface of Mars // *Cambridge Planet. Sci. Ser. No. 6*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2006.
- *Demidov N.E., Gilichinsky D.A., Boynton W.V., Hamara D., Zuber M.T., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Tretyakov V.I., Saunders R.S., Smith D.E.* Water distribution in martian permafrost regions from joint analysis of HEND (Mars Odyssey) and MOLA (Mars Global Surveyor) data // *Astronomy Letters*, 2008, т. 34, № 10, с. 713–723.
- *Farmer J.D.* Mars Exopaleontology // *Palaios*, 1995, 10 (3), p. 197–198.
- *Garvin J.B., Sakimoto S.E.H., Frawley J.J., et al.* Topographic evidence for geologically recent near-polar volcanism on Mars // *Icarus*, 2000, vol. 145, № 2, p. 648–652.
- *Gilichinsky M., Demidov N. and Rivkina E.* Morphometry of volcanic cones on Mars in perspective of astrobiological research // *International Journal of Astrobiology*, 2015, 14 (4), p. 537–545.
- *Gilichinsky D., Wilson G., Friedmann E., McKay C., Sletten R., Rivkina E.* Microbial populations in Antarctic permafrost: biodiversity, state, age, and implication for astrobiology // *Astrobiology*, 2007, v. 7, p. 275–311.
- *Goordial J., Davila A., Lacelle D., Pollard W., Marinova M., Creer C., DiRuggiero J., McKay C. and Whyte L.* Nearing the cold-arid limits of microbial life in permafrost // *The ISME journal*, 2016, p. 1–12.
- *Hodges C.A. and Moore H.J.* The subglacial birth of Olympus Mons and its aureoles // *Journal of Geophysical Research*, 1979, vol. 84, № B14, p. 8061–8074.
- *Hvidberg C.S.* Polar caps / chapter in *Water on Mars and Life*. Berlin: Springer. 2005. P. 129–152.
- *Kargel J.S.* Mars: A Warmer, Wetter Planet. London, Praxis-Springer, 2004, 557 p.
- *Kasting J.* The origins of water on Earth // *Scientific Amer. Spec. ed.*, 2003, p. 28–33.
- *Neukum G., Jaumann R., Hoffmann H. et al.* Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera // *Nature*, 2004, vol. 432, № 7020, p. 971–979.

- *Neukum G., van Gasselt S.* Recent volcanism at the martian North Pole // *Geophysical Research Abstracts*, 2006, vol. 8, p.11103.
- *Oro J.* Comets and the origin of life on the Primitive Earth // *Origins*, 2005, vol. 6, p. 549–565.
- *Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer C., Petit J.-R., Salamatin A., Priscu J.C.* Physical, chemical and biological processes in lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes // *Nature*, 2001, v. 144, p. 603–609.

### **Chapter 23**

## **PERSPECTIVE OF LIFE SEARCH IN MARTIAN ECONICHES**

© **N.E. Demidov**

*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

Mars may be divided on five ecological niches according to presence and state of water: permanent polar caps, dry regolith, subpermafrost aquifers, cryopegs and ice containing regolith. Basic limiting factors for the search of life in this econiches are: absence of water (dry regolith), depth of burial (cryopegs and subpermafrost aquifers), age (ice containing permafrost and polar caps). High priority targets for the search of life on Mars are represented by permanently frozen deposits of young polar volcanoes and ash layers in polar caps. During volcanic eruptions microorganisms from subpermafrost aquifers could propagate to the surface and survive in permafrost or ice for million years, as it is known to happen on Earth. Possibility of specific lithic habitats in dry layer must also be taken into account.

## *Глава 24*

### **ВОЗМОЖНАЯ «ОБИТАЕМОСТЬ» МАРСИАНСКОГО РЕГОЛИТА И ОБНАРУЖЕНИЕ «БИОМАРКЕРОВ» ДРЕВНЕЙ ЖИЗНИ**

© **А.К. Павлов**

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

В работе проанализирована возможность существования микроорганизмов земного типа в поверхностном слое марсианского грунта в современную эпоху. На основе проведенных в последние годы экспериментов показано, что низкое атмосферное давление, низкая температура и высокий радиационный фон не являются «стерилизующими» факторами. При наличии минимального питания земные микроорганизмы способны размножаться в марсианском реголите используя пленки сорбированной жидкой воды, образующиеся при сублимации подповерхностного льда. Указаны возможные места для поисков следов жизни на Марсе в современную эпоху.

Проанализировано возможность сохранения «биомаркеров» (сложных органических молекул и изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) в условиях высокого фона космических лучей на Марсе. Показана возможность их деградации на шкале  $10^8$ – $10^9$  лет, что делает маловероятным обнаружение следов «древней» жизни в поверхностном слое марсианского грунта.

### **Введение**

В настоящее время на поверхности Марса существование земных форм жизни практически невозможно из-за отсутствия жидкой воды и стерилизации поверхности мощным УФ излучением Солнца. Оба фактора связаны с малой толщиной современной атмосферы Марса ( $15$ – $16$  г/см<sup>2</sup>). С другой стороны, все проводившиеся и планируемые эксперименты по обнаружению «следов жизни» на Марсе могут исследовать только поверхностный слой марсианского грунта глубиной от нескольких сантиметров для миссий Phoenix и Curiosity до  $1$ – $2$  метров для подготавливаемой миссии ExoMars. Поэтому проблемы возможности существования микроорганизмов в этом слое в современную эпоху и сохранения сложных органических молекул, как «биомаркеров» древней биосферы являются очень важными для выбора объектов и методов поиска «следов жизни» на Марсе.

### **Марсианский реголит, как «возможная ниша» для микроорганизмов в современную эпоху**

Факторами, которые препятствуют существованию любой биологической активности в современном марсианском реголите, обычно считаются:

1) низкое давление атмосферных газов ( $3$ – $7$  мбар) и, как следствие, отсутствие жидкой воды,

2) низкие температуры (глобальная средняя температура поверхности  $\sim 200^\circ\text{K}$ ) и их большие суточные, географические и сезонные вариации ( $140^\circ$ – $290^\circ\text{K}$ ),

3) высокая интенсивность ионизирующего излучения (в 100 раз больше, чем на поверхности Земли) за счет интенсивной бомбардировки поверхности частицами космических лучей из-за малой толщи атмосферы и отсутствия у Марса сильного магнитного поля.

Однако данные о составе реголита, включая большое содержание льда [1, 2] и перхлоратов в подповерхностных слоях [3], и проведенные лабораторные эксперименты [4] показали, что марсианский реголит может быть подходящей средой для жизни отдельных видов земных микроорганизмов. На рис. 1 приведено распределение водяного льда на Марсе в подповерхностном слое реголита глубиной  $d < 1$  м по данным миссии *Odyssey*. Миссия *Phoenix* обнаружила значительные включения льда на глубине нескольких сантиметров при заборе образцов реголита, а также высокое содержание перхлоратов 0.5–2% в грунте [3]. Эти данные показывают, что марсианский реголит во многих местах представляет собой тонкий сухой слой мелкого песка на поверхности и слои «вечной мерзлоты» на больших глубинах. Подобные условия были воспроизведены в наших модельных экспериментах с использованием вакуумной камеры и циклических вариаций температуры поверхности образцов имитирующих суточный ход температуры на поверхности Марса.

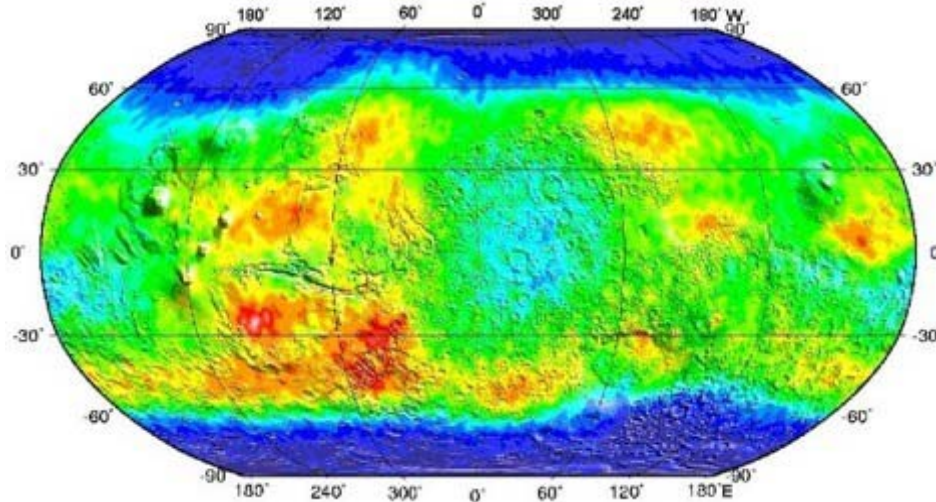


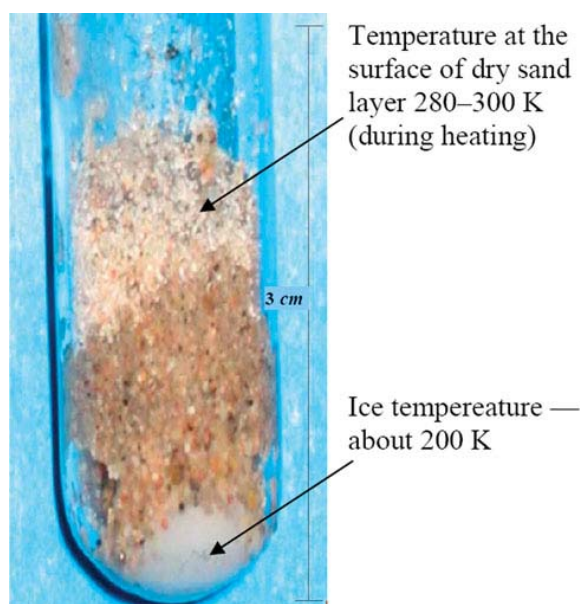
Рис. 1. Распределение льда по данным прибора HEND (MarsOdyssey).

Было продемонстрировано, что за счет диффузии водяного пара и его сорбции на поверхности частиц песка в модельном образце образуется «мокрый слой» с существенным содержанием (до 10%) жидкой воды при давлении в камере менее 1 мбар. На рис. 2 показана структура образца после проведения нескольких суточных циклов нагрева и охлаждения поверхности.

В этой же серии экспериментов была исследована возможность метаболической активности бактерий *Vibriosp.* (мезофиллы, факультативные анаэробы) в тех же модельных циклах. Было впервые обнаружено, что при

наличии в образце минимального количества глюкозы  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  г/г и  $5 \cdot 10^{-3}$  г/г неорганических веществ (M9 Standard Minimal Medium), бактерии размножались в «мокроем слое» образца [4]. Таким образом, само по себе низкое атмосферное давление на современном Марсе не может рассматриваться, как «стерилизующий фактор». Этот вывод был в дальнейшем подтвержден другими исследователями на разных типах бактерий [5, 6].

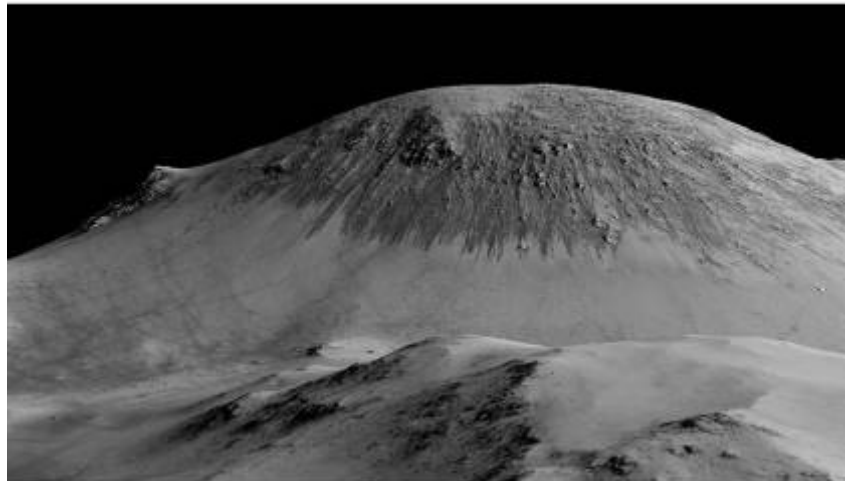
Возможность существования жидких соляных растворов в марсианском реголите в настоящее время широко обсуждается в связи обнаружением, так называемых Recurring Slope Lineae (RSL), представляющих собой появляющиеся весной на склонах образования, показанные на рис. 3, которые повторяются каждую весну и интерпретируются как кратковременные потоки жидких растворов солей или выбросы газов [7]. Присутствующие в грунте Марса перхлораты ( $\text{NaClO}_4$ ,  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$ ) имеют очень высокую растворимость в воде и очень низкие температуры замерзания насыщенных растворов от  $-40^\circ\text{C}$  до  $-70^\circ\text{C}$ . Поэтому образование пленок жидких растворов перхлоратов в марсианском реголите может происходить при существенно отрицательных температурах, что было нами зафиксировано в экспериментах по измерению проводимости модельных образцов, содержащих смесь песка и перхлоратов, в зависимости от температуры. С другой стороны, в ряде работ было показано, что некоторые земные микроорганизмы, в частности, метаногены, могут иметь активный метаболизм при температуре  $-20^\circ\text{C}$  и, возможно,  $-40^\circ\text{C}$  [8].



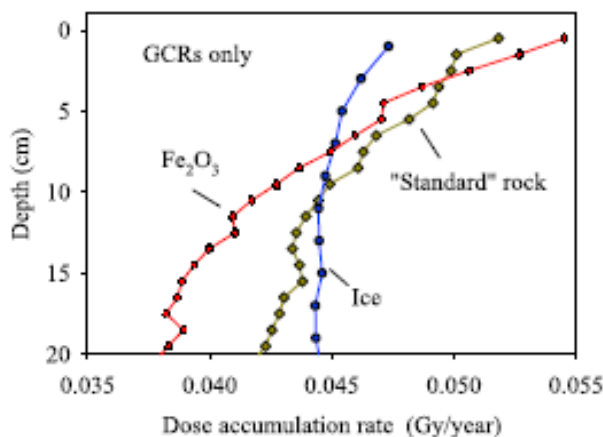
**Рис. 2.** Структура образца после проведения циклов нагрева и охлаждения поверхности, имитирующих суточный ход температуры.

Это означает, что современные низкие температуры в марсианском грунте не могут рассматриваться как фактор, исключающий возможность существования активных биологических форм в подповерхностном слое, где суточные и сезонные колебания температуры периодически могут создавать условия, достаточные для активного метаболизма бактерий.

Дозы ионизирующей радиации в марсианском реголите за счет бомбардировки галактическими космическими лучами (ГКЛ) для современной атмосферы рассчитывались нами в работе [9]. Солнечные космические лучи (СКЛ) поглощаются современной атмосферой Марса и не вносят существенного вклада по сравнению с ГКЛ. Результаты приведены на рис. 4. Такая интенсивность радиации не является смертельной для земных микроорганизмов, если они находятся в активном состоянии даже несколько дней в течение марсианского года. Более того, существующие на Земле радиорезистентные бактерии могли бы выдерживать аккумуляцию больших доз радиации, находясь в «спящем» состоянии десятки тысяч лет, с последующим восстановлением популяции за короткий период (несколько дней) при появлении жидкой воды и наличии источников энергии. Проведенные нами модельные эксперименты по выживаемости сообществ микроорганизмов в образцах грунта, взятого в пустынях, под действием облучения сверхбольших доз радиации (до 100 Мрад) при низких температурах и низком атмосферном давлении, также показали способность отдельных видов переносить такие дозы в этих условиях.



**Рис. 3.** RSL структуры, появляющиеся весной на склонах.



**Рис. 4.** Дозы, накапливаемые в марсианском реголите от ГКЛ.

Таким образом, высокий радиационный фон на современном Марсе также не является критическим фактором с точки зрения «обитаемости» поверхностного слоя реголита.

В качестве возможных источников энергии в этом слое могут рассматриваться органические вещества, поступающие при аккреции частиц космической пыли, метеоритов и комет, а также продукты фотохимических реакций в атмосфере. В частности, в работе [6] показана такая возможность для оксидирующих СО бактерий на Марсе.

### **Эволюция условий в поверхностном слое на долговременной шкале**

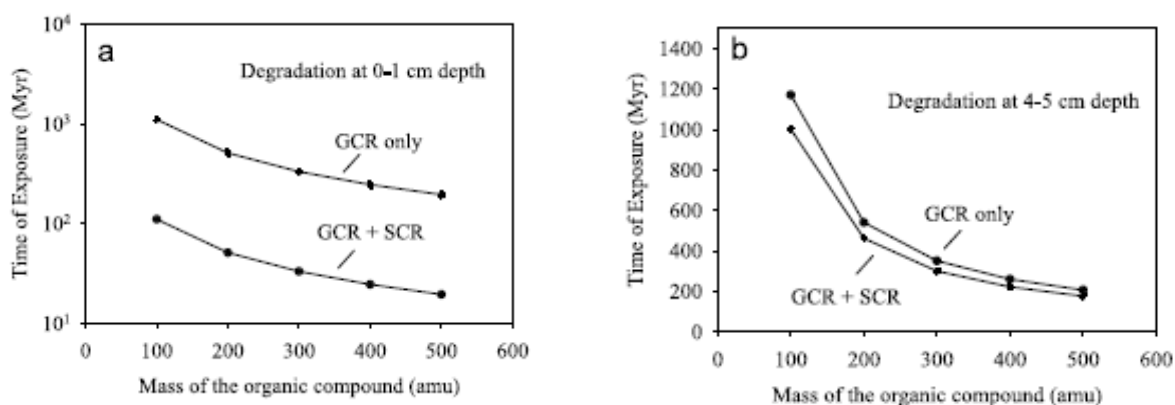
Вследствие отсутствия массивного спутника, согласно опубликованным в ряде работ расчетам, наклонение оси вращения Марса испытывает большие вариации в диапазоне  $0^{\circ}$ – $45^{\circ}$  с основным периодом 120 000 лет. Вместе с вариациями эксцентриситета орбиты и положения перигелия это приводит к очень большим вариациям климатических условий и массы атмосферы Марса [10]. При наклонении  $<10^{\circ}$  на полюсах образуются «холодные ловушки» из-за касательного падения солнечного излучения, что приводит к вымораживанию основной массы атмосферного  $\text{CO}_2$  и его сорбции в реголите полярных и умеренных широт, а также к постепенному перераспределению водяного льда в поверхностном слое планеты за счет переноса водяного пара из низких широт в полярные и умеренные широты. Последний процесс протекает гораздо медленнее процесса захвата  $\text{CO}_2$ , так как в процессе переноса водяной пар постоянно сорбируется реголитом и затем должен снова сублимировать. Кроме того, сама скорость потерь водяного льда за счет процессов сублимации и диффузии из реголита даже с относительно небольших глубин медленный процесс и составляет менее  $10^{-2}$  мм/год на глубине 20–30 см при температуре  $200^{\circ}\text{K}$  [11]. В результате время формирования ледяного слоя в полярном реголите и полярных шапках может достигать нескольких тысяч лет. Такой процесс может приводить к образованию «ловушек» для  $\text{CO}_2$  в поверхностных слоях. Мы провели лабораторное моделирование возможности сохранения  $\text{CO}_2$  в таких ловушках при повышении температуры и увеличении давления газа в ловушке. Проведенные эксперименты показали, что слои замороженных растворов перхлоратов и смеси растворов с песком удерживают газ без потерь при давлении 1 бар даже при толщине слоя 1 см. Выход газа носил пороговый характер и начинался при температурах, близких к точке расплавления замороженных растворов. Таким образом, большие количества атмосферного  $\text{CO}_2$  могут быть захвачены в относительно неглубоких слоях марсианского грунта, которые подвержены температурным вариациям при изменениях наклона оси вращения планеты. В этом случае при увеличении наклона и, как следствие, средней температуры в этих слоях и перехода  $\text{CO}_2$  в газовую фазу «ловушки» могут удерживать газ длительное время

(тысячи лет) до их разрушения за счет сублимации водяных паров. Поэтому давление в атмосфере может быть в разы и даже на порядок меньше по сравнению с ситуацией, когда весь газ выйдет из ловушек. Такая неравновесная ситуация может приводить к периодическому появлению достаточно «толстой» атмосферы с возможностью существования жидкой воды на поверхности и созданием благоприятных условий для развития гипотетических микроорганизмов в поверхностном слое реголита. Современная атмосфера также может находиться в «неравновесном» состоянии на шкале от нескольких тысяч до ста тысяч лет. Газовые ловушки в поверхностном реголите могут рассматриваться как перспективные места для существования активной жизни в современную эпоху. Поэтому районы с возможными сезонными выбросами газов (RSL и сезонные выбросы метана) могут быть объектами для поисков микроорганизмов на Марсе.

### **Устойчивость «биомаркеров» в поверхностных слоях марсианского грунта**

Эксперименты по изучению образцов грунта на марсоходе Curiosity и планируемых миссиях нацелены, в первую очередь, на поиск так называемых «биомаркеров» древней жизни на Марсе, к которым относятся, прежде всего, сложные органические молекулы и изотопное отношение  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в содержащих углерод породах. Наиболее существенной трудностью сохранения биомаркеров в современных условиях является высокий фон космических лучей и сильно окислительная среда, что приводит к деградации сложных органических молекул. В работе [9] нами были рассчитаны времена существования органических молекул в зависимости от времени облучения при современном потоке ГКЛ и СКЛ. Вклад СКЛ оценивался с учетом вклада возможных периодов вымораживания атмосферы до уровня 0.2 мбар, занимающих до 10% времени за последние  $10^9$  лет согласно [10]. На рис. 5 представлены результаты наших вычислений, которые показывают, что для молекул с массой 500 а.е.м. время облучения с уменьшением исходной концентрации в 1000 раз составляет  $\sim 10^8$  лет и менее в слое породы глубиной до 5 см. Только для молекул с массой 100 а.е.м. это время может достигать  $10^9$  лет. В другой работе [12] нами было показано, что при концентрациях углерода в образце  $10^{-5}$  г/г биологический сдвиг в изотопном отношении  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (обогащение легким изотопом) будет полностью маскироваться накоплением изотопа  $^{13}\text{C}$  за счет образования в ядерных реакциях с частицами космических лучей на шкале 3 миллиарда лет. При меньших концентрациях время накопления пропорционально уменьшается. Отметим, что результаты измерений космогенных изотопов ( $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  и  $^{36}\text{Ar}$ ), проведенных миссией Curiosity с помощью бурения в поверхностных слоях трех различных камней, дают короткие времена экспозиции КЛ по сравнению с геологическим возрастом образцов определенным К/Ar методом. Поскольку «молодых» кратеров в районе исследований не обна-

ружено, то существуют только два возможных объяснения: «опрокидывание» камней под длительным воздействием ветровой эрозии или «блокирование» потока КЛ на поверхности Марса за счет существования относительно недавно мощной атмосферы (в 30–50 раз) превышающей массу современной или (и) экранирование КЛ толстым слоем воды (>7 м) в виде льда или жидкости. Первая гипотеза сталкивается с большими трудностями из-за относительно низкой скорости эрозии на Марсе. Вторая требует наличия больших резервуаров CO<sub>2</sub>, которые в настоящее время не идентифицированы.



**Рис. 5.** Время уменьшения в 1000 раз числа органических молекул в зависимости от молекулярной массы при современных потоках ГКЛ и СКЛ и давлении атмосферы 7 мбар

Таким образом, представляется малоперспективным поиск биомаркеров в поверхностных породах с длительным (более 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> лет) временем экспозиции современным потоком космических лучей. Более вероятно обнаружение биомаркеров в местах с относительно недавней биологической активностью или породах, недавно выброшенных на поверхность с глубины в несколько метров (вещество «молодых» кратеров).

### Выводы

1. Марсианский реголит может быть пригодным для жизни земных микроорганизмов в отдельных районах с неглубоким залеганием водяного льда даже в современную эпоху.

2. На шкале времени 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> лет условия в марсианском реголите и на поверхности Марса могут сильно изменяться при колебаниях наклона оси вращения планеты и создавать долговременные «газовые ловушки» в грунте с давлением CO<sub>2</sub> до единиц бар, которые при долговременных изменениях климата могут приводить к значительному увеличению массы атмосферы и возможности существования жидкой воды на поверхности планеты.

3. Интенсивное облучение космическими лучами не создает непосредственной угрозы стерилизации поверхностного слоя для периодически переходящих в активное состояние микроорганизмов

4. Биомаркеры «древней» биосферы могут полностью деградировать при современных условиях на шкале  $10^8$ – $10^9$  лет под действием космических лучей

5. Перспективными местами для поисков «следов жизни» в поверхностных породах на Марсе являются районы с наблюдаемой сезонной эмиссией газов и выходов жидких растворов, а также недавно выброшенный из кратеров на поверхность материал.

#### Литература

1. *Feldman, W.C. et al.* // *Science*, 2002, v. 297, p.75–78.
2. *Mitrofanov, I. et al.* // *Science*, 2002, v. 297, p.78–81.
3. *Hecht, M. et al.* Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site // *Science*, 2009, v. 325, p. 64–67.
4. *Pavlov A.K. et al.* Growth of microorganisms in martian-like shallow subsurface conditions: laboratory modelling // *International Journal of Astrobiology*, 2010, v. 9, № 01, p. 51–58.
5. *Schuerger A.C. et al.* Growth of *Serratia liquefaciens* under 7 mbar, 0°C, and CO<sub>2</sub>-enriched anoxic atmospheres // *Astrobiology*, 2013, v. 13(2), p. 115–131.
6. *King G.M.* Carbon monoxide as a metabolic energy source for extremely halophilic microbes: Implications for microbial activity in Mars regolith // *PNAS*, 2015, v. 112, № 14, p. 4465–4470.
7. *McEwen A.S. et al.* Seasonal Flows on Warm Martian Slopes // *Science*, 2011, v. 333, p. 740–743.
8. *Rivkina E.M. et al.* Metabolic Activity of Permafrost Bacteria below the Freezing Point // *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, v. 66, № 8, p. 3230–3233.
9. *Pavlov A.A. et al.* Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays // *Geophysical research letters*, 2012, v. 39, p. 13202–13206.
10. *Armstrong J.C. et al.* A 1 Gyr climate model for Mars: new orbital statistics and the importance of seasonally resolved polar processes // *Icarus*, 2004, v. 171, p. 255–271.
11. *Mellon M.T. et al.* The presence and stability of ground ice in the southern hemisphere of Mars // *Icarus*, 2004, v. 169, p. 324–340.
12. *Pavlov A.A. et al.* Alteration of the carbon and nitrogen isotopic composition in the Martian surface rocks due to cosmic ray exposure // *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, v. 119, № 6, p. 1390–1402.

**POSSIBLE HABITABILITY OF MARTIAN REGOLITH  
AND RESEARCH OF ANCIENT LIFE “BIOMARKERS”**

© **A.K. Pavlov**

*Ioffe Institute, 26 Polytechnical str., Saint Petersburg, Russia, 194021*

We consider environments of modern subsurface martian regolith layer as possible habitats of the terrestrial like microorganisms. Recent experimental studies demonstrate that low atmospheric pressure, low temperature and high level of cosmic rays ionizing radiation are not able to sterilize the subsurface layer of Mars. Even nonextremophile microorganisms can reproduce in martian regolith using films of liquid water which are produced by absorption of water vapor of subsurface ice sublimation. Areas of possible seasonal subsurface water flow (recurring slope lineae, dark dune spots) and methane emission regions are discussed as perspective sites for discovering of modern life on Mars.

Degradation of “biomarkers” (complex organic molecules and isotopic ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) in martian soil under high level of cosmic rays radiation is analyzed. We show the ancient biomarkers are effectively destroyed within period  $10^8$ - $10^9$  years. As result, probability of its discovering in shallow subsurface martian layer is low.

*Глава 25*

**УСТОЙЧИВОСТЬ СООБЩЕСТВ ЗЕМНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ  
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ РЕГОЛИТА МАРСА**

© **В.С. Чепцов**<sup>1,2</sup>, **Е.А. Воробьева**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

Современные астробиологические исследования сфокусированы на Марсе, как на одном из наиболее перспективных объектов Солнечной системы для поиска микробной жизни. Предполагается, что потенциальная биосфера Марса может быть криоконсервирована и хранится в течение миллиардов лет в анабиотическом состоянии, подобно микробным сообществам арктических и антарктических древних вечномерзлых пород. В этом случае клетки микроорганизмов лишены возможности восстанавливать повреждения, или эти процессы значительно замедлены, и основным фактором, вызывающим гибель клеток, является ионизирующее излучение. В серии экспериментов мы исследовали влияние совокупности физических факторов, характерных для марсианского реголита (и близких к космической среде), на естественные микробные сообщества экстремальных местообитаний Земли: вечномерзлых пород и пустынных почв. Целью работы являлось определение пределов устойчивости природных экосистем к комплексному воздействию гамма-излучения, низкой температуры и низкого давления и оценка длительности сохранения потенциальной биосферы Марса в анабиотическом состоянии. Установлено, что биомаркеры и жизнеспособные микроорганизмы сохраняются в образцах почв и вечномерзлых пород после облучения дозами до 1 МГр (более высокие дозы не исследовали) в модельных условиях марсианского реголита. На основании полученных данных предполагается, что в случае существования на раннем Марсе биосферы земного типа микроорганизмы могли сохраняться в поверхностных или подповерхностных слоях реголита в течение не менее десятков миллионов лет после изменения климата.

Одной из фундаментальных проблем современной науки является проблема возникновения и эволюции жизни на Земле и во Вселенной. В поисках ответа на вопрос о происхождении жизни проводятся исследования известных нам организмов, изучение эволюции древней Земли и Солнечной системы, поиск микроорганизмов в древних земных отложениях, а также предпринимаются попытки обнаружения жизни вне Земли – на различных объектах Солнечной системы и в открытом космосе.

Одним из наиболее активно исследуемых астробиологических объектов является Марс. К настоящему времени на планете сформировался экстремальный для организмов земного типа комплекс физико-химических условий: низкие температуры и давление, высокая интенсивность ионизирующего и ультрафиолетового излучения, присутствие сильных окислителей, низкая доступность воды [4, 54]. Однако в ходе долговременной эволюции на планете были периоды с более благоприятными условиями для

зарождения и развития жизни [22, 28, 78]. Если в эти периоды на Марсе сформировалась жизнь, то есть вероятность, что она сохраняется до сих пор в анабиотическом состоянии, подобно земным микробным сообществам Арктики и Антарктики [13, 32, 75]. В этом случае клетки лишены возможности репарировать повреждения (или эта способность значительно снижена), и основным лимитирующим фактором, обуславливающим гибель клеток и деградацию биомолекул, будет являться ионизирующее излучение [54].

Для прогнозирования длительности возможного сохранения потенциальной биосферы Марса в анабиотическом состоянии применяются имеющиеся данные о радиорезистентности земных организмов и интенсивности ионизирующего излучения на поверхности и в реголите Марса [12, 21, 28]. Однако следует отметить, что пределы устойчивости земных организмов к воздействию ионизирующих излучений остаются невыясненными. К настоящему времени известно, что наиболее радиорезистентные виды микроорганизмов в чистой культуре способны выдерживать воздействие доз около 20–25 кГр [11, 19, 30, 46, 74]. Сведения же об устойчивости микробных сообществ более противоречивы – по данным различных авторов стерилизующие дозы варьируют от 15 до более 50 кГр [42, 58, 64, 65, 80]. При этом известно, что грибы более чувствительны к воздействию радиации, чем прокариоты, и в составе микробных сообществ полностью элиминируются дозами 1–10 кГр [16, 38, 42, 62, 64, 72]. Однако недавно в рамках проекта STARLITE [45] было показано, что грибы вида *Cryomyces antarcticus* сохраняют жизнеспособность после воздействия гамма-излучения в дозах до 117 кГр [50], что подтверждает необходимость дальнейших работ по исследованию пределов радиорезистентности микроорганизмов.

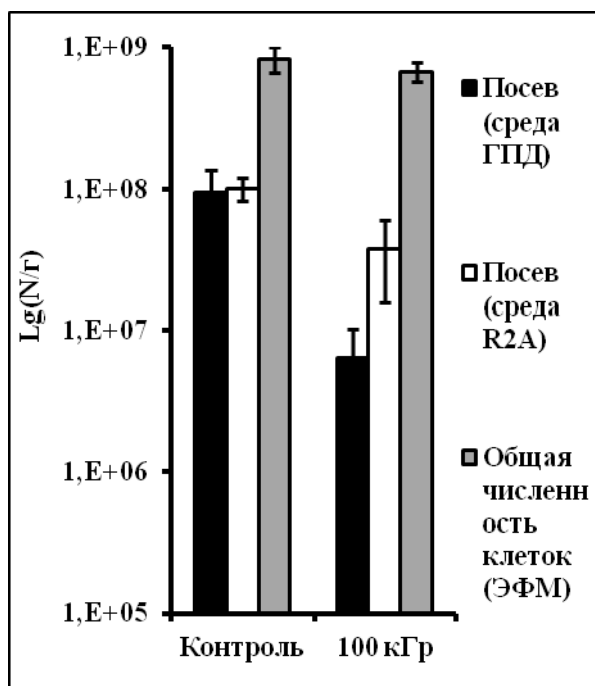
Оценивая возможность существования потенциальных микроорганизмов во внеземной среде необходимо учитывать модификацию радиационных эффектов при изменении условий облучения. Факторами, модифицирующими эффекты воздействия излучений, могут быть температура, давление, концентрации кислорода и воды и др. [5, 10, 12, 21]. В частности, показано, что при облучении гамма-излучением в условиях понижения температуры до  $-79^{\circ}\text{C}$  бактерии *Deinococcus radiodurans* сохраняют жизнеспособность после воздействия доз до 80 кГр, в то время как при облучении в нормальных условиях дозы около 20 кГр являются стерилизующими [21], а цианобактерии *Chroococcidiopsis sp.* при облучении в высушенном состоянии выдерживают дозы в два раза более высокие, чем при облучении в жидкой суспензии (11.5 кГр и 24 кГр соответственно) [74]. В связи с этим очевидно, что для более точной оценки устойчивости и длительности сохранения потенциальной биосферы на различных объектах Солнечной системы и, в частности, на Марсе необходимо моделирование

как можно более полного комплекса факторов среды, характерных для целевого астробиологического объекта.

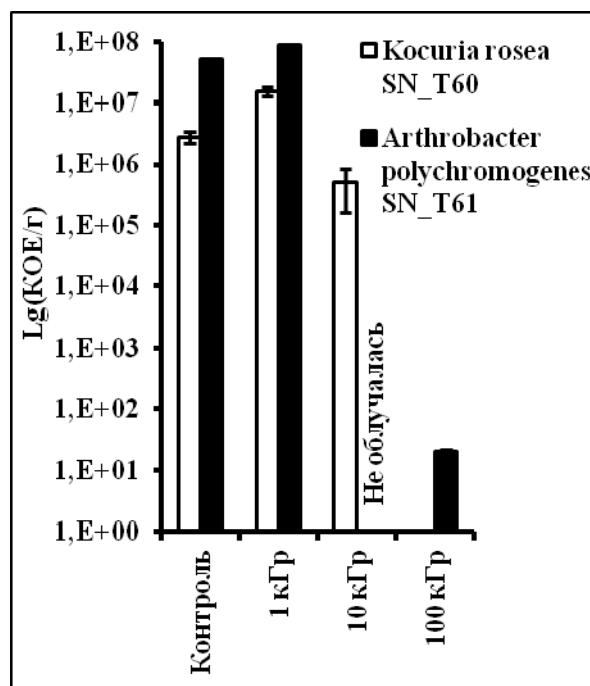
Рассматривая возможность существования на каком-либо космическом объекте биосферы земного типа также необходимо учитывать, что биосфера должна обладать высоким функциональным разнообразием, что позволяет ей выполнять свои биогеохимические функции (осуществлять превращение и транспорт вещества и энергии) [1]. Очевидно, что высокое функциональное разнообразие не может быть обеспечено лишь одной формой жизни [1]. В связи с этим необходимо изучение возможности существования и сохранения в инопланетных и космических условиях не только единичных организмов, а целых экосистем. При этом перспективно исследование природных микробных сообществ экстремальных местообитаний, существующих в условиях, приближенных к условиям целевых астробиологических объектов и являющихся их земными аналогами [28]. Такими аналогами являются экосистемы Арктики и Антарктики, пустынных и засоленных почв и др. [25, 28, 52, 66, 79]. Микроорганизмы этих экосистем имеют развитые взаимосвязанные механизмы ответа на различные стрессовые воздействия [24, 68] и повышенный адаптационный потенциал [39]. Высокое биоразнообразие природных микробных сообществ, широкое разнообразие экологических ниш (микрозон), обладающих различными физико-химическими параметрами, дублирование экологических функций многими организмами, внутри- и межпопуляционные взаимодействия, присутствие пула метаболитов и протекторные свойства естественной среды обитания также способствуют поддержанию гомеостаза экосистем и их функционированию и выживанию при экстремальных нагрузках [2, 3, 23, 42, 68]. Все эти факторы могут существенно корректировать отклик биосистем на воздействие инопланетных и космических условий в астробиологических экспериментах.

Принимая во внимание вышеизложенные данные, нами была проведена серия экспериментов по облучению микробных сообществ экстремальных местообитаний (почв пустынь и вечномерзлых осадочных пород) и чистых культур бактерий, выделенных из них, гамма-излучением в градиенте доз 1 Гр – 1 МГр в условиях низкого давления (1 торр) и низкой температуры ( $-50^{\circ}\text{C}$ ), т.е. смоделированы основные физические параметры поверхностного слоя реголита Марса [6–9]. Были получены экспериментальные данные о сохранении микробными сообществами высокой численности жизнеспособных клеток и биоразнообразия при облучении гамма-излучением дозой до 1 МГр в модельных условиях (рис. 1). Установлено, что во всех исследованных экотопах независимо от генезиса реакция микробных сообществ на облучение сходна: часть популяций переходит в некультивируемое (возможно, покоящееся) состояние, другая часть, напротив, активизируется. Следствием этих процессов является перестройка таксономической структуры сообществ. При этом, как правило,

происходит некоторое угнетение отдельных доминантных и субдоминантных популяций, что создает условия для роста минорных видов. Однако в целом структура сообщества и его биоразнообразие сохраняются. После облучения дозой 100 кГр наибольшую устойчивость проявляли бактерии родов *Deinococcus*, *Methylococcus*, *Clostridium* и *Arthrobacter*. Также после воздействия смоделированных экстремальных нагрузок микробные сообщества сохраняли высокое функциональное разнообразие и метаболическую активность. Чистые культуры бактерий проявили значительно более низкую устойчивость – лишь один штамм выдержал облучение дозой 100 кГр, при этом численность живых клеток снизилась на 7 порядков (рис. 2).



**Рис. 1.** Влияние гамма-излучения (100 кГр), низкой температуры (–50°C) и низкого давления (1 торр) на численность культивируемых бактерий и общую численность прокариот в образце серозема.



**Рис. 2.** Влияние гамма-излучения (100 кГр), низкой температуры (–50°C) и низкого давления (1 торр) на численность клеток чистых культур бактерий, иммобилизованных в монтмориллоните.

Следует отметить, что сведения о сохранении прокариотами жизнеспособности при облучении гамма-излучением в дозах свыше 80 кГр отсутствуют [19, 21, 42, 46, 58]. В наших же экспериментах сохранялась не только высокая численность живых клеток, но и высокое бактериальное разнообразие. Это может быть связано как с протекторной ролью минеральных частиц и органических веществ в образцах [26, 42], внутри- и межпопуляционными взаимодействиями [51], так и с условиями проведения облучения [12, 21]. В частности, известно, что понижение температуры во время облучения снижает повреждения, вызываемые свободными радикалами, вследствие чего возможно снижение радиочувствительности мик-

роорганизмов [28]. Кроме того, одним из основных источников свободных радикалов при воздействии ионизирующего излучения является вода [12], а при понижении давления возможен процесс ее сублимации [56]. Вызванное этим процессом высушивание образцов (и, возможно, клеток) могло несколько снизить количество образующихся свободных радикалов, и, следовательно, уменьшить повреждения микробных сообществ при облучении. Также возможно, что радиорезистентность микроорганизмов в целом значительно недооценена (что обсуждалось выше). Максимальные экстремальные воздействия, примененные в наших экспериментах, не привели к стерилизации образцов, и выяснение пределов устойчивости природных микробных сообществ является целью дальнейших исследований.

Экстраполяция доз радиации, примененных в ходе исследований, на интенсивность излучения на поверхности Марса позволяет предполагать возможность сохранения потенциальных микробных сообществ в анабиотическом состоянии в течение не менее 13 млн. лет в поверхностном слое марсианского реголита (защищенном от УФ-излучения) в условиях, близких к современным [35], что более чем на порядок превосходит оценки, дававшиеся ранее [12, 21]. Следует отметить, что с увеличением глубины интенсивность излучения снижается и по расчетным данным на глубине 20–30 см составляет 45–65 мГр/год [20, 57]. На такой глубине доза излучения 1 МГр аккумулируется в течение 15–22 млн. лет. На глубине же в 5 метров можно предполагать сохранение потенциальной биосферы в течение не менее 200 миллионов лет при интенсивности излучения 5 мГр/год [57].

Приведенные выше расчеты не учитывают возможности репарации повреждений клетками при отрицательных температурах. Однако известно, что микроорганизмы способны размножаться при температурах до  $-18^{\circ}\text{C}$  и сохраняют метаболическую активность при  $-33^{\circ}\text{C}$  [61]. С учетом этих данных можно предполагать еще более длительное сохранение потенциальной биосферы. Также существует возможность периодического наступления более благоприятных условий для жизнедеятельности микроорганизмов. Например, в некоторых районах Марса возможно повышение температур выше  $0^{\circ}\text{C}$ , образование жидкой воды [41, 56, 61]. Ряд исследований свидетельствует о том, что при этом возможен метаболизм, рост и размножение микроорганизмов, а также развитие их устойчивости к экстремальным воздействиям. На сегодняшний день показана возможность роста бактерий при низких температурах в условиях атмосферы Марса [15, 47, 63]. Изучена жизнеспособность организмов при комплексном воздействии УФ излучения, засоленности, давления, углекислой атмосферы и температуры в различных вариантах комбинации факторов [31, 67, 69, 71, 73]. При этом выяснено, что наиболее губительным для живых организмов фактором на поверхности Марса является ультрафиолетовое излучение (поглощающееся первыми миллиметрами реголита). Однако в то же время

имеются сведения о способности микроорганизмов выдерживать влияние высоких доз УФ излучения и развивать устойчивость к такому воздействию [76]. Также известно, что микроорганизмы способны увеличивать радиорезистентность при воздействии сублетальных доз ионизирующего излучения [34, 70]. Продемонстрирована возможность роста бактерий в средах, моделирующих солевой состав марсианского грунта [48]. Обнаружено, что земные неэкстремофильные бактерии способны развиваться в пленках воды, предположительно образующихся при сублимации грунтового льда через реголит Марса [56]. В случае периодического наступления благоприятных условий (повышения температуры и образования доступной воды) существует вероятность восстановления клетками радиационных повреждений, их размножения и направленной адаптации с последующим сохранением в дормантном состоянии до следующего момента изменения условий среды [78]. Если такие условия создаются чаще, чем каждые 13–200 млн. лет, то длительность сохранения потенциальной биосферы Марса может быть практически неограниченной.

Приведенные выше данные могут быть использованы не только для прогноза длительности сохранения потенциальной биосферы Марса, но также могут применяться и для оценки вероятности межпланетного переноса жизни метеоритами и космической пылью между различными объектами (в том числе между Землей и Марсом) ввиду сходства экстремальных факторов, воздействующих в этом случае на микроорганизмы (радиация, низкие температуры, низкое давление). По современным оценкам, приблизительно одна тонна марсианской породы, выброшенной в результате бомбардировки планеты кометами и метеоритами, прибывает на Землю каждый год в форме метеоритов [33]. Около тридцати обнаруженных на Земле метеоритов идентифицированы как имеющие марсианское происхождение [43, 49], и они, очевидно, представляют только малую часть переданной с Марса на Землю породы. Кроме того, известно, что около 40 тыс. тонн межпланетных частиц пыли поступает в атмосферу Земли каждый год [40]. Согласно расчетам, глобальная бомбардировка планет в состоянии переместить куски породы с поверхности планеты, такой как Марс, на поверхность планеты, такой, как Земля, не нагревая их внутри до температур достаточно высоких, чтобы убить прокариотические или эукариотические микроорганизмы во время выброса с Марса или входа через атмосферу Земли [14, 44, 77]. Также показана возможность выживания микроорганизмов при сверхскоростных ударах в составе метеоритов [18, 29, 37, 53, 55] и при экспонировании в условиях открытого космоса [17, 27, 59, 60]. Однако большая часть межпланетного материала, который прибывает на Землю, проводит перед этим в космосе длительное время. При этом возможно облучение потенциальных микроорганизмов, находящихся в составе метеоритов и комической пыли, ионизирующей радиацией, и длительность их сохранения будет зависеть от их радиорезистентности. Учитывая

интенсивность облучения метеоритов в Солнечной системе [36] и выживание микробных клеток после облучения ионизирующей радиацией в дозе 1 МГр, можно предполагать сохранение потенциальных микроорганизмов в составе метеоритов в течение не менее 3.5 млн. лет. В то же время следует отметить, что для более точной оценки необходимо моделирование воздействия полного спектра космических лучей в связи с различием биологических эффектов, которые они вызывают.

Приведенные данные убеждают в высокой устойчивости организмов земного типа к воздействию инопланетных и космических факторов, что дает основания предполагать возможность существования жизни за пределами нашей планеты. При этом пределы устойчивости организмов к воздействию экстремальных факторов не до конца ясны, остается неопределенной возможная продолжительность сохранения ими жизнеспособности, а модели пока не могут в полной мере отразить реальную обстановку целевых объектов астробиологии, ограничиваясь имитацией лишь некоторых факторов, что обуславливает необходимость дальнейших исследований.

### **Благодарности**

Работа поддержана грантом РФФИ №13-04-01982-а и Программами Президиума РАН «Эволюция органического мира и планетарных процессов» и «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной Системы» (ПРАН I.7П).

Авторы выражают свое уважение памяти Д.А. Гиличинского, предоставившего образцы вечномерзлых пород, а также благодарят Р. Энджела и О.Р. Коцюрбенко за предоставленные образцы пустынных почв.

### **Литература**

1. *Вернадский В.И.* (1989). Биосфера и ноосфера. Ярошевский А.А., Соколов Б.С. (Ред.). Наука.
2. *Звягинцев Д.Г.* (1987). Почва и микроорганизмы. МГУ.
3. *Звягинцев Д.Г. и др.* (2005). Биология почв. М.: изд-во МГУ.
4. *Комаров И.А., Исаев В.С.* (2010). Криология Марса и других планет Солнечной системы. М.: Научный мир.
5. *Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С.* (1982). Основы радиационной биофизики: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та,
6. *Чепцов В.С. и др.* (2015). Современные проблемы науки и образования, (3):619–619.
7. *Чепцов В.С. и др.* (2016). Реголит Марса как потенциальная среда сохранения микробных экосистем. Актуальные проблемы радиобиологии и астробиологии. Генетические и эпигенетические эффекты ионизирующих излучений, 132–138.
8. *Чепцов В.С. и др.* К вопросу о возможности существования микробных экосистем земного типа в условиях Марса и открытого космоса. Труды XXI Международной конференции и дискуссионного научного клуба. Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии, 184–186.
9. *Чепцов В.С. и др.* (2016). Современные проблемы науки и образования, (5):297-297.
10. *Эйдус Л.Х.* (1972). Физико-химические основы радиобиологических процессов и защиты от излучений. М.: Атомиздат.

11. *Battista J.R. et al.* (1999). *Trends in Microbiology*, (7):362–365.
12. *Baumstark-Khan C., Facius R.* (2002) Life under conditions of ionizing radiation. G. Horneck, C. Baumstark-Khan (Eds.). *Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life*. Springer, Berlin, 261-284.
13. *Beaty D.W. et al.* (2005). *Astrobiology*, 5(6):663–689.
14. *Belbruno E. et al.* (2012). *Astrobiology*, 12(8):754–774.
15. *Berry B.J.* (2005). Growth and Survival of Bacteria in Simulated Martian Conditions: A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Biology in the Department of Biology in the College of Science at the University of Central Florida. B.S. University of Central Florida.
16. *Brown K.A.* (1981). *Soil Biology and Biochemistry*, 13:469–474.
17. *Bucker H., Horneck G.* (1975). *Acta Astronaut*, 2(3–4):247–264.
18. *Burchell M.J. et al.* (2011). Survival of Yeast Spores in Hypervelocity Impacts Events up to Velocities of 7.4 km sec<sup>-1</sup>. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, 42:1759.
19. *Cox M.M., Battista J.R.* (2005). *Nature Reviews Microbiology*, 3(11):882–892.
20. *Dartnell L.R. et al.* (2007). *Biogeosciences*, 4:545–558.
21. *Dartnell L.R. et al.* (2010). *Astrobiology*, 10(7):717–732.
22. *Davila A.F., Schulze-Makuch D.* (2016). *Astrobiology*, 16(2):159–168.
23. *Decho A.W.* (2000). *Continental shelf research*, 20(10):1257–1273.
24. *Dion P., Nautiyal C.S.* (2008). *Microbiology of extreme soils*. Berlin, Springer.
25. *El-Sayed W.S., Ghanem S.* (2009) *Biotechnology*, (1):78–85.
26. *Facius R. et al.* (1979). *Life Sciences in Space Research*, 17:123–128.
27. *Fairén A.G. et al.* (2010). *Astrobiology*, 10(8):821–843.
28. *Fajardo-Cavazos P. et al.* (2009). *Astrobiology*, 9(7):647–657.
29. *Ferreira A.C. et al.* (1999). *Extremophiles*, 3: 235–238.
30. *DiRuggiero J. et al.* (2013). *Biogeosciences*, 10:2439–2450.
31. *Galletta G. et al.* (2009). *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5(H15):686–687.
32. *Gilichinsky D.A. et al.* (2007). *Astrobiology*, 7(2):275–311.
33. *Gladman B.* (1997). *Icarus*, 130:228–246.
34. *Harris D.R. et al.* (2009). *Journal of Bacteriology*, 191(16):5240–5252.
35. *Hassler D.M. et al.* (2014). *Science*, 343(6169):1244797.
36. *Horneck G. et al.* (2002). Viable transfer of microorganisms in the solar system and beyond. G. Horneck, C. Baumstark-Khan (Eds.). *Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life*. Springer, Berlin, 57–76.
37. *Horneck G. et al.* (2008). *Astrobiology*, 8(1):17–44.
38. *Johnson L.F., Osborne T.S.* (1964). *Canadian Journal of Botany*, 42:105–113.
39. *Kryazhevskikh N.A. et al.* (2013). *Microbiology*, 82(1):29–42.
40. *Love S.G., Brownlee D.E.* (1993). *Science*, 262:550–553.
41. *Martin-Torres F.J. et al.* (2015). *Nature Geoscience*, 8(5):357–361.
42. *McNamara N.P. et al.* (2003). *Applied Soil Ecology*, 24(2):117–132.
43. *Meyer C.* (2002). *Mars Meteorite Compendium*. NASA, Houston.
44. *Mileikowsky C. et al.* (2000). *Icarus*, 145(2):391–427.
45. *Moeller R. et al.* (2017). *Astrobiology*, doi:10.1089/ast.2016.1571.
46. *Musilova M. et al.* (2015). *Astrobiology*, 15(12):1076–1090.
47. *Nicholson W.L. et al.* (2013). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(2):666-671.
48. *Nicholson W.L. et al.* (2012). *Icarus*, 220(2):904–910.
49. *Nyquist L.E. et al.* (2001). *Space Science Reviews*, 96:105–164.

50. *Pacelli C. et al.* (2017). *Astrobiology*, doi:10.1089/ast.2015.1456
51. *Panitz C. et al.* (2014). Biofilms and planktonic cells of *Deinococcus geothermalis* in extreme environments. In 40th COSPAR Scientific Assembly. 40:2430, Abstract F3. 3-4-14.
52. *Parro V. et al.* (2011). *Astrobiology*, 11(10):969–996.
53. *Pasini D.L.S. et al.* (2013). Survival of *Nannochloropsis* Phytoplankton in Hypervelocity Impact Events up to Velocities of 6.07 km/s. *EPSC*, 8:396.
54. *Pavlov A.K. et al.* (2002). *Planetary and Space Science*, 50:669–673.
55. *Pavlov A.K. et al.* (2007). *Geophysical Research Abstracts*, 9:03830.
56. *Pavlov A.K. et al.* (2010). *International Journal of Astrobiology*, 9(1):51–58.
57. *Pavlov A.A. et al.* (2012). *Geophysical research letters*, 39(13):L13202.
58. *Rainey F.A. et al.* (2005). *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9):5225–5235.
59. *Reitz G. et al.* (1995). *Radiation and Environmental Biophysics*. 34(3):139–144.
60. *Rettberg P. et al.* (2002). *Advances in Space Research*, 30(6):1539–1545.
61. *Rummel J.D. et al.* (2014). *Astrobiology*, 14(11):887–968.
62. *Schiels L.M. et al.* (1961). *Ecology*, 42(3):440.
63. *Schuerger A.C.* (2013). *Astrobiology*, 13(2):115–131.
64. *Sheremata T.W. et al.* (1997). *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 28:1177–1190.
65. *Skyring G.W., Thompson J.P.* (1966). *Plant and Soil*, 24:289–298.
66. *Smith H.D., McKay C.P.* (2005). *Planetary and Space Science*, 53(12):1302–1308.
67. *Smith D.J. et al.* (2009). *Astrobiology*, 9(2):221–228.
68. *Soina V.S., Vorobyova E.A.* (2004). *Adaptation of Bacteria to the Terrestrial Permafrost Environment. Origins.* Springer Netherlands, 427–444.
69. *Tauscher C. et al.* (2006). *Astrobiology*, 6(4):592–605.
70. *Tesfai A.T. et al.* (2011). *International Journal of Radiation Biology*, 87(6):571–578.
71. *Thomas D.J. et al.* (2008). *International Journal of Astrobiology*, 7(3-4):243–249.
72. *Thompson J.P.* (1990). *Soil Biology and Biochemistry*, 22:229–240.
73. *Vera J.P.D. et al.* (2010). *Astrobiology*, 10(2): 215–227.
74. *Verseux C. et al.* (2017). *Astrobiology*, doi:10.1089/ast.2015.1450
75. *Vorobyova E. et al.* (1997). *FEMS Microbiology Reviews*, 20:277–290.
76. *Wassmann M. et al.* (2010). *Astrobiology*, 10(6):605–615.
77. *Weiss B.P. et al.* (2000). *Science*, 290:791–795.
78. *Westall F. et al.* (2013). *Astrobiology*, 13(9):887–897.
79. *Wierzchos J. et al.* (2012) *International Microbiology*, 15:171–181.
80. *Yardin M.R. et al.* (2000). *Radiation Physics and Chemistry*, 57:565–568.

## **Chapter 23**

### **RESISTANCE OF TERRESTRIAL MICROBIAL COMMUNITIES TO IMPACT OF PHYSICAL CONDITIONS OF SUBSURFACE LAYERS OF MARTIAN REGOLITH**

© **V.S. Cheptsov<sup>1,2</sup>, E.A. Vorobyova<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Currently, astrobiology is focused on Mars as one of the most perspective objects in the Solar System to search for microbial life. It was assumed that the

putative biosphere of Mars could be cryopreserved and had been stored for billions of years in anabiotic state like microbial communities of Arctic and Antarctic permafrost deposits have been preserved till now for millions of years. In this case microbial cells should be not able to repair the damages or these processes have to be significantly depressed, and the main factor causing cell's death should be ionizing radiation. In a series of experiments we simulated the effects of combination of physical factors known as characteristics of the Martian regolith (and close to the space environment) on the natural microbial communities inhabiting xerophytic harsh habitats with extreme temperature conditions: polar permafrost and desert soils. The aim of the study was to examine the cumulative effect of factors (gamma radiation, low temperature, low pressure) to assess the possibility of metabolic reactions, and to find limits of the viability of natural microbial communities after exposure to the given conditions. It was found that microbial biomarkers could be reliably detected in soil samples after radiation dose accumulation up to 1 MGy (not further investigated) in combination with exposure to low temperature and low pressure. Resistance to extremely high doses of radiation in simulated conditions proves that if there was an Earth-like biosphere on the early Mars microorganisms could survive in the surface or subsurface layers of the Martian regolith for more than tens of millions of years after climate change. The study gives also some new grounds for the approval of transfer of viable microorganisms in space.

*Глава 26*

**ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
И ЭКЗОБИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ  
ЛЕДЯНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ**

© **М.Б. Симаков**

*Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Все гигантские планеты в Солнечной системе имеют большое число спутников, часть из которых представляет собой крупные планетарные тела, состоящие из силикатных компонентов и большого количества водного льда. По последним данным, полученным с помощью космических аппаратов, три из четырех больших лун Юпитера – Европа, Ганимед, Каллисто – имеют все условия для существования под ледяной корой огромного слоя жидкой воды – внутреннего океана. Аналогичный подледный океан имеет и спутник Сатурна Титан. Часть объектов внешних областей Солнечной системы, таких как ледяные спутники Урана: Ариэль, Оберон, Титания и Умбриэль, спутник Нептуна Тритон, карликовые планеты внешней области: Плутон, Харон, Эрис, Седна и Орхус также рассматриваются в качестве обладателей подобных океанов. Главными критериями существования биосферы с точки зрения экзобиологии являются: 1) наличие на космическом объекте жидкой воды в течение длительного геологического периода времени; 2) наличие большого количества разнообразных органических соединений; 3) наличие источников энергии, необходимых для поддержания биохимических процессов, в том числе, в виде химической энергии. Физико-химические условия в подледных океанах полностью удовлетворяют этим условиям. Внутренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах, и существование таких возможных экосистем значительно расширяет зону обитаемости в любой звездной системе.

Одним из основных вопросов современного естествознания является проблема возникновения жизни на Земле и других планетах. Главными критериями существования биосферы с точки зрения экзобиологии являются: 1) наличие на космическом объекте жидкой воды в течение длительного геологического периода времени; 2) наличие большого количества разнообразных органических соединений; 3) наличие источников энергии, необходимых для поддержания биохимических процессов, в том числе, в виде химической энергии.

До недавнего времени единственными кандидатами, подходящими для существования живых организмов в Солнечной системе, рассматривались только планеты земной группы Марс и Венера. Однако успешное изучение внешних областей системы при помощи космических аппаратов показало, что существует класс крупных космических объектов, которые содержат в своем составе огромные объемы жидкой воды. Расчеты показывают, что, например, объем жидкого океана внутри Европы превосходит объем жидкой воды нашей планеты в несколько раз. Таким образом, внут-

ренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут предоставлять огромное жизненное пространство для внеземных организмов.

### **Система Юпитера**

Интерес к внутренним океанам спутников Юпитера возник в конце 70-х годов прошлого века после теоретических работ Консолманьо и Льюиса [1], которые указали на возможность полного расплавления и дифференциации ледяной компоненты Галилеевых спутников (Европа, Ганимед, Каллисто) под действием внутренних источников тепла, среди которых аккреционное тепло, радиоактивный распад ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) и приливной разогрев.

По данным миссии «Галилео» [2] построены численные модели химического состава и внутреннего строения спутников Юпитера. Европа и Ганимед прошли через стадию полной дифференциации с образованием водно-ледяных внешних оболочек, силикатной мантии и металлического ядра. Каллисто – частично дифференцированный спутник, обладающий ледяной корой мощностью 270–300 км и мантией, простирающейся до центра спутника и состоящей из гомогенной смеси льда и железокремниевой компоненты. Мощность водно-ледяной оболочки составляет от 100 до 900 км. Химический состав подледного океана зависит от исходных компонентов. В настоящее время общепринято, что валовые составы спутников близки к составу обыкновенных E и EE хондритов.

Европа имеет очень молодую, по геологическим меркам, поверхность, одну из самых ровных в Солнечной системе. Стоит отметить разнообразие следов тектонической и криовулканической активности. Примечательная деталь рельефа Европы – ударный кратер Пуйл, центральная горка которого выше, чем кольцевой вал. Это может свидетельствовать о выходе вязкого льда или воды через отверстие, пробитое астероидом. Наиболее интересны с астробиологической точки зрения такие детали поверхности спутника, как разломы и трещины, пересекающие небесное тело в разных направлениях. Скорее всего, эти разломы появляются под воздействием приливных сил Юпитера и позволяют компонентам внутреннего океана достигать поверхности [3]. В самом верхнем слое льда могут существовать линзы жидкой воды, которые мигрируют внутри этого слоя [4]. Именно там надо искать возможные биомаркеры. Еще одна цель, где их нужно искать – гейзеры, наличие которых на Европе было подтверждено в прошлом году с помощью орбитальной обсерватории «Хаббл» [5]. Гейзеры дают потенциальную возможность получить образцы воды из внутренних частей спутника без необходимости бурить ледяную кору.

Важный вопрос составляет температура внутреннего океана. Силикатное ядро спутника содержит радиоактивные изотопы, которые дают на дне дополнительный источник тепла, которого вполне достаточно для осуществления термальной конвекции толщи воды, что позволяет переносить

сильных потоков вещества со дна океана в его толщу, а теплые потоки могут достигать ледяного панциря и воздействовать на него. Результаты такого воздействия можно увидеть на поверхности спутника, например, в так называемых районах Хаоса. Это формы, образовавшиеся в результате расплавления поверхности под действием теплых потоков из глубины океана, которое приводит к выходу вязкого льда на поверхность. Стоит отметить возможное существование градиента солености в океане, начиная от слоя почти пресной воды, контактирующего со льдом [6]. И таких слоев может быть несколько, расположенных один над другим, различающихся по солености и температуре.

Компоненты, необходимые для поддержания окислительно-восстановительного баланса возможной биосферы, могут синтезироваться в нескольких районах: гидротермальные системы на дне глобального внутреннего океана, реакции «холодной серпентинизации» на границе силикатная мантия/океан, радиолитические окислители, получающиеся на поверхности Европы под воздействием солнечной радиацией и заряженных частиц из магнитосферы Юпитера. Дневная доза излучения на поверхности составляет около 540 бэр (5,4 Зв) – почти в миллион раз больше, чем на Земле. Радиолиз поверхностного льда расщепляет воду на её составляющие – кислород и водород, которые частично адсорбируются поверхностью, а частично покидают её, образуя атмосферу. Основной компонент атмосферы Европы – молекулярный кислород, поскольку у него длительный период жизни, а легкий водород быстро улетает в космическое пространство. Кроме того, на самой поверхности обнаружено большое количество перекиси водорода и ионов сульфата. В частности, поверхность спутника содержит сульфат магния в форме эпсомита ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) [7], минерала, который на Земле образуется в результате испарительной концентрации рассолов – преимущественно солёных озёр, а также морских бассейнов. Ключевым моментом становится скорость (или сама возможность) доставки этих окислителей с поверхности спутника внутрь его океана. Оценки такой скорости приводят к тому, что до  $4 \times 10^9$  моль окислителей в год может пополнять состав океанической воды [8, 9].

Разброс в оценках толщины ледяной коры Европы достаточно большой – от 10–15 до 100–200 км [10]. Чем тоньше кора, тем больше возможностей для обмена веществом с поверхностью спутника, который требуется для поддержания биохимических циклов в течение более-менее значимого времени. Как мы уже видели, поверхность Европы строго окислительная из-за сильных радиационных полей. Внутренний же океан, скорее всего, должен быть намного более восстановительным. Гидростатическое давление у дна океана достигает 200 МПа, что сравнимо с максимальным давлением на Земле, которое не является непреодолимым препятствием для обитающих там организмов. Микроорганизмы, изолированные со дна

Марианской впадины, с глубины в 10 км, неплохо живут при давлении 108,6 МПа и температуре около 2°C.

Один из основных вопросов – исходное состояние азота и углерода и их содержание в материале, из которого образовался спутник. Химический состав ювенильного океана зависит от процессов выщелачивания силикатных пород, «серпентинизации», и контролируется кинетически и термодинамически. По расчетам, вода может проникать вглубь силикатной мантии до 25 км [11], в процессе чего выделяется большое количество водорода – одного из ключевых компонентов многих биохимических циклов. Похожие процессы идут и на нашей планете при взаимодействии воды с оливином земной коры. Растворение и окисление первичных минералов, осаждение вторичных, таких как Mg–Fe–филлосиликаты, магнетит, фосфаты, приводит к крайне восстановительному (обогащенному H<sub>2</sub>) и щелочному первичному океану.

Существует три возможных варианта химического состава океана: 1) нейтральный – система, состоящая из Na–Mg–SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O компонентов; 2) щелочной (Na–SO<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub>); 3) кислотный (Na–H–Mg–SO<sub>4</sub>). Любой из этих химических вариантов способен поддерживать существование биологических систем внутри водного слоя.

Ганимед, крупнейший спутник нашей Солнечной системы, также имеет водно-ледяную оболочку поверх силикатной коры, которая покрывает мантию и ядро спутника. Именно океан на глубине 150 км может объяснить наличие магнитного поля у этого небесного тела. По некоторым оценкам, толщина ледовой мантии Ганимеда может достигать от 30 до 120 км, а глубина океана – до 800 км. Наличие льдов высокого давления, которые покрывают силикатную мантию на дне океана, несколько уменьшает экзобиологический потенциал этого спутника, так как они препятствуют процессам серпентинизации в силикатной коре. То же относится и к третьему ледяному спутнику – Каллисто.

Для Каллисто разработаны аналогичные модели внутреннего строения [12], в соответствии с которыми спутник состоит из трех химически разных оболочек: 1) внешняя водно-ледяная (ледяная кора, внутренний водный океан, льды высокого давления на его дне); 2) каменно-ледяная мантия (смесь льдов высоко давления и хондритового материала); 3) центральное железокремниевое ядро. Наличие внутреннего океана полностью согласуется с магнитометрическими данными зонда «Галилео». Толщина ледяной литосферы оценивается в 135–150 км, толщина самого океана – 120–180 км. В пользу существования океана говорит и морфология ударных кратеров на поверхности как Каллисто, так и Ганимеда. Явно видно участие жидкой воды в процессах их формирования.

## **Система Сатурна**

Титан является, с точки зрения астробиологии, одним из наиболее интересных объектов Солнечной системы [13]. Условия на спутнике удовлетворяют всем необходимым критериям существования биосферы:

1. Наличие жидкой воды, которая существует геологический период времени;

2. Наличие широкого набора неорганических и органических веществ, необходимых для метаболизма;

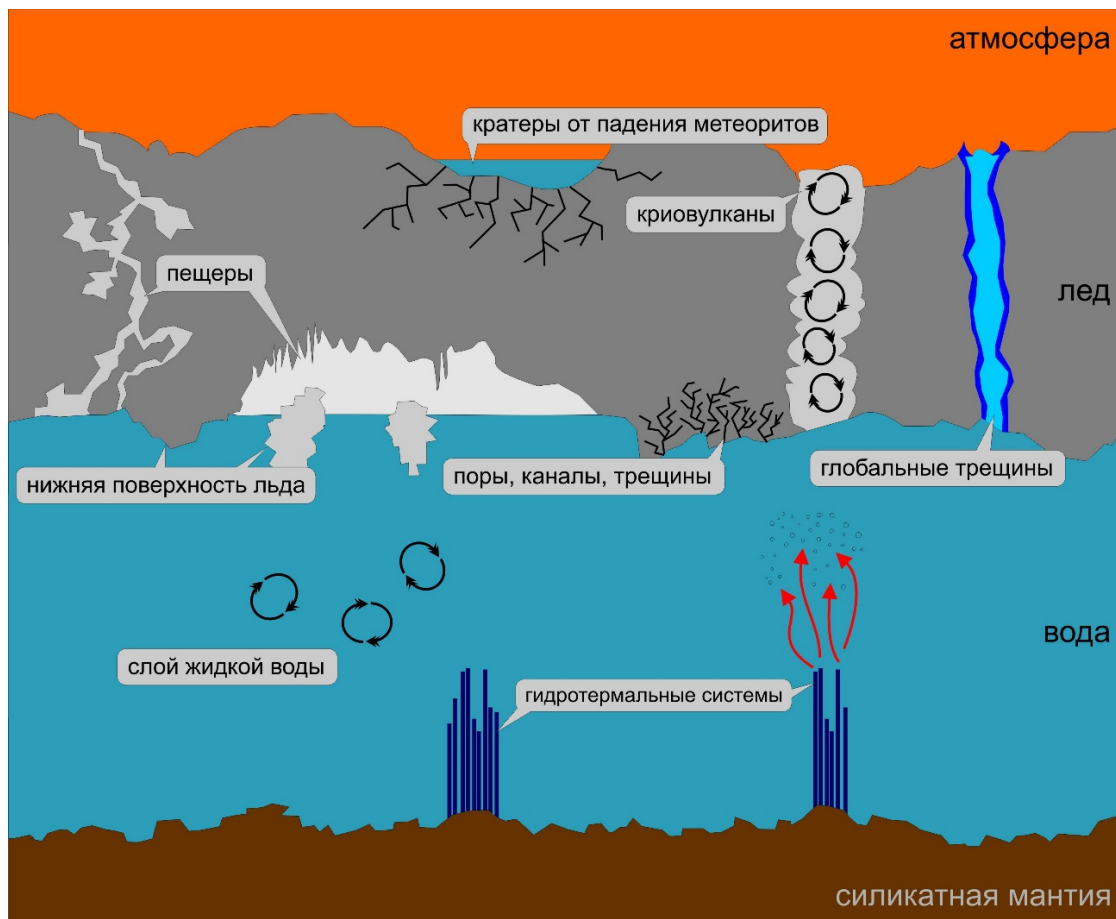
3. Наличие источников энергии, таких как: 1) радиогенное тепло ядра; 2) приливная энергия; 3) удары метеоритов; 4) солнечная энергия атмосферной фотохимии; 5) молнии в атмосфере; 6) космические лучи; 7) электроны магнитосферы Сатурна; 8) химический потенциал окислительно-восстановительных реакций.

Теоретические оценки показывают существование массивного океана жидкой воды под ледяной поверхностью Титана и в настоящее время. Экспериментальное доказательство на основе полетных данных было недавно получено космическим аппаратом «Кассини». Океан представляет собой сложную химическую систему, содержащую большое количество разнообразных соединений, как органических, так и неорганических, которые могут использоваться для поддержания биосферы внутри спутника.

Предложены несколько возможных ниш для существования биологических сообществ [13]: 1) сам слой жидкой воды, где температура и давление вполне соответствуют необходимым параметрам и который может содержать разнообразные органические и неорганические составляющие; 2) нижняя поверхность льда, имеющая большую площадь; 3) поры, каналы различных размеров и пакеты жидкой воды в нижнем слое ледяной коры; 4) места криовулканической активности на поверхности спутника, где внутренний водный слой может реагировать с продуктами сложной атмосферной фотохимии; 5) разветвленная сеть пещер и других образований, которая может быть связана как с криогенным вулканизмом, так и с воздействием приливных сил; 6) трещины в ледяном слое; 7) кратеры, оставшиеся после падения метеоритов, в которых могут образовываться значительные массивы жидкой воды на достаточно продолжительное время; 8) места гидротермальной активности на дне океана (рисунок).

Основное отличие Титана от спутников системы Юпитера – наличие плотной атмосферы, толщиной более 400 км, давление которой у поверхности в полтора раза превышает эту величину для Земли. Существует несколько теорий возникновения такой азотсодержащей атмосферы: 1) фотолиз исходного атмосферного аммиака; 2) генерация азота из того же атмосферного аммиака под действием метеоритных ударов; 3) доставка на последней стадии образования спутника элементарного азота и других азотсодержащих соединений кометами; 4) генерация азота из аммиак-содержащих льдов Титана на стадии большой бомбардировки, че-

рез несколько миллионов лет после образования спутника; 5) газообразный азот – продукт биологической активности внутри спутника [14]. Главный аргумент в пользу вторичности азота (как и в земной атмосфере) – низкое содержание первичного аргона по отношению к азоту ( $^{36}\text{Ar}/\text{N}_2 \approx 2.8 \times 10^{-7}$ ). Если бы азот был захвачен непосредственно во время образования спутника, то это соотношение было бы гораздо больше.



Основные данные по составу атмосферы Титана были получены при спуске зонда «Гюйгенс» на поверхность спутника. Главный компонент атмосферы – азот (причем соотношение  $^{14}\text{N}_2/^{15}\text{N}_2$  значительно ниже, чем в земной атмосфере), метан (1.4–4.9%, в зависимости от высоты), аргон с неожиданно высоким содержанием отношением  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ . Сюрпризом оказалось отсутствие таких благородных газов, как Хе и Кр ( $<10^{-8}$ ), а также СО и СО<sub>2</sub>. Возможно, углекислый газ присутствует на поверхности или внутри спутника. Важнейшим компонентом атмосферы является метан. Это достаточно летучий и фотохимически нестабильный газ, и его наличие в атмосфере предполагает существование источника для поддержания постоянной концентрации метана. Это могут быть как озера или моря на поверхности, заполненные метаном, так и большие запасы клатратов метана в ледяном слое. Либо метан является продуктом биологической активности.

Большинство ученых рассматривает атмосферу Титана как модель первичной восстановительной атмосферы Земли, то есть, тех условий, в которых проходили реакции абиогенного синтеза на заре возникновения жизни. Вся атмосферная химия Титана построена на радикальных реакциях под действием ультрафиолета и потоков заряженных частиц. Цепь фотохимических превращений азота и метана приводит в итоге к образованию сложных углеводородов, предельных и непредельных, нитрилов и изонитрилов. В атмосфере были зафиксированы такие азотсодержащие соединения, как синильная кислота (HCN), цианоацетилен (HC<sub>3</sub>N) и цианоген (C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>), ацетилен и диацетилен, полиины и некоторые органические нитрилы. Возможны реакции в атмосфере спутника, которые приводят к синтезу биологически значимых органических соединений, в том числе, аминокислот и оснований нуклеиновых кислот.

Источники энергии в атмосфере – УФ излучение Солнца, даже, несмотря на то, что оно составляет лишь 1.1% от земного; космические лучи; солнечный ветер (в те моменты, когда спутник выходит за пределы магнитосферы Сатурна); потоки заряженных частиц магнитосферы Сатурна; электрические разряды.

Один из основных процессов, требующих внимания – это взаимодействие воды с органическими соединениями, синтезировавшимися в богатой атмосфере Титана. Фотохимические процессы могут приводить к выпадению на поверхность спутника до 25 см твердых органических компонентов каждые 20 млн лет. Естественно, температура на поверхности спутника слишком мала для существования жидкой воды. Но есть несколько исключений из данного правила. Первое – это криомагма, поднимающаяся из внутреннего океана. Криомагма – смесь, состоящая из воды, неорганических солей и летучих органических компонентов. Эта субстанция может вести себя подобно магматическим потокам в земной океанической коре [15]. Она может как заполнять трещины и пустоты в нижнем слое льда, так и подниматься до поверхности спутника сквозь всю толщу. Выходы криомагмы на поверхность можно идентифицировать как места криовулканизма [16], и такие объекты были зафиксированы приборами миссии «Кассини». Второй источник жидкой воды на поверхности спутника, существующей достаточно долгое время – метеоритные удары. В зависимости от массы метеорита, скорости и направления его полета, удар о ледяную поверхность может оставлять озера жидкой воды на достаточно продолжительное время, до 10<sup>4</sup> лет [17]. Часть органических молекул может сформироваться как во время пролета астероида в атмосфере, так и в момент его удара о поверхность, которая сама покрыта слоем сложной органики.

Поверхность Титана очень молода по сравнению с другими спутниками системы Сатурна, такими как Реа, Тетис, Диона, чья поверхность плотно покрыта метеоритными кратерами. На Титане же, на 20% поверхности,

исследованной радаром, было обнаружено только около 50 кратеров ударного происхождения. Большинство кратеров испещрено каналами, появившимися, очевидно, под воздействием потоков жидкости. Молодость поверхности указывает на динамические геологические процессы, протекающие на спутнике. Кроме того, поверхность спутника носит явные следы атмосферной эрозии – были обнаружены каньоны, русла рек, углеводородные озера, холмы и дюны. Отличительная черта поверхности – она несет в себе следы процессов, происходящих как в атмосфере, так и внутри спутника. Дюны, в отличие от земных, состоят из гранул органического вещества, источник которого – сложные процессы, протекающие в атмосфере Титана. Следует обратить внимание на количество и качественный состав поверхностной органики. Это полимеры, которые при гидролизе способны давать многие биологически значимые соединения, в частности, аминокислоты и основания нуклеиновых кислот, карбоновые кислоты и другие. Возможные источники жидкой воды – криовулканизм и удары метеоритов.

Часть органики также может сформироваться после момента удара в результате пьезоэффекта в слое поверхностного льда. В итоге получается водный раствор, содержащий сложную органику, синтезированную в атмосфере, как неполярную (углеводороды), так и полярную (нитрилы). Именно реакции нитрилов в водной среде представляют особый интерес для экзобиологии. Возможность существования жидкой воды на поверхности служит связующим звеном между внутренним теплым (по сравнению с температурой на поверхности) океаном и холодной, но химически очень активной, атмосферой.

Особое внимание стоит уделить синтезу азотсодержащих соединений, часть из которых образует плотный слой в атмосфере, непрозрачный для солнечных лучей. Состав этих «толинов» очень сложен и плохо изучен. В атмосфере существует три слоя толинов. Во время своего спуска «Гюйгенс» обнаружил органические молекулы весом до 100 дальтон (пределы прибора) на высотах до 120 км. В качестве основных продуктов пиролиза ( $600^{\circ}\text{C}$ ) были зафиксированы аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и цианистый водород ( $\text{HCN}$ ), что позволило предположить наличие в атмосферной органике таких групп, как нитрилы ( $-\text{CN}$ ), изонитрилы ( $-\text{NC}$ ), имино ( $-\text{C}=\text{N}-$ ) и аминокислоты ( $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NH}-$ ,  $-\text{N}<$ ). Углеводородный смог играет важную роль в атмосферном температурном режиме. Из-за него возникает парниковый эффект, который не позволяет конденсироваться азоту.

Именно низкотемпературный гидролиз этих толинов может дать кислородсодержащие органические соединения [18, 19], необходимые для биохимических процессов. Это основной путь внедрения кислорода в состав атмосферной органики.

Поскольку атмосфера Титана состоит в основном из азота и метана с примесью легких углеводородов, цепочка синтеза более сложных соедине-

ний начинается с фотолиза молекулярного азота и метана, первичными продуктами которого будут синильная кислота (HCN) и аммиак. Дальнейшее воздействие солнечного света или потоков заряженных частиц может привести к таким сложным органическим молекулам, как цианамид, 2-цианогуанидин, меламина, гидроцианид гуанидина, N'-цианоформамид и 1,2,4-триазол. Все эти соединения могут быть построены на основании взаимодействия исходных молекул синильной кислоты и аммиака. Цианамид, полученный на первой стадии, либо полимеризуется, либо реагирует с исходными молекулами HCN или NH<sub>3</sub>. Среди продуктов фотосинтеза были обнаружены: аминацетонитрил, сукцинонитрил, ацетогуанамина и аденин.

Особо стоит отметить синтез аденина, важнейшего компонента нуклеиновых кислот. Другие представители этого класса, содержащие в своем составе кислород, могут быть получены уже при гидролизе веществ, синтезированных в атмосфере спутника.

Гидролиз толинов, даже при очень низких температурах, может привести к таким важным соединениям, как тимин, аспарагин, аспарагиновая кислота, глутамин, глутаминовая кислота, гистидин, не говоря уже о более простых молекулах, таких как глицин или аланин. Всего в продуктах гидролиза было идентифицировано 5 оснований нуклеиновых кислот и 17 аминокислот, входящих в состав белков [19, 20].

В итоге была установлена возможность синтеза основной части биологически значимых для земных организмов молекул в условиях атмосферы и поверхности Титана. При наличии механизмов доставки этих компонентов внутрь спутника это является важным условием возникновения и поддержания биосферы во внутреннем океане Титана. Возможное существование как кислотного, так и щелочного внутреннего водного океана на Титане вносит большую долю неопределенности в механизм гидролиза исходных нитрилов. Именно влияние pH на скорость и продукты гидролиза толинов планируется изучить в будущих экспериментах.

В настоящее время спутник представляет собой несколько сфер: внутреннее силикатное ядро (0–1750 км), покрытое слоем льда высокого давления (1750–2200 км), далее следует внутренний океан жидкой воды (2200–2505 км), покрытый сверху ледяной корой (2505–2575 км).

Океан представляет собой сложную химическую систему, содержащую большое количество разнообразных соединений, как органических, так и неорганических. Большинство неорганических компонентов было в составе исходных компонентов протопланетарной туманности, из которой образовалась система Сатурна. Естественно, точный состав океанической воды в настоящее время неизвестен. Однако теоретические модели показывают, что экстракция хондритного материала, которая происходила на стадии дифференциации спутника, приводит к выделению таких важных

компонентов, как  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  и многих других.

Дополнительное количество разнообразных веществ, в том числе сложной органики, было доставлено на спутник кометами и метеоритами. Фосфор, сера и другие элементы, необходимые для биохимии, также присутствуют в исходном материале. Таким образом, мы имеем хорошее место для зарождения литоавтотрофных биохимических процессов.

Основное свойство любого живого организма – использовать энергию химических реакций для поддержания всех жизненных процессов. В земных условиях организмы используют различные окислительно-восстановительные пары, основной из которых является  $O_2 \rightarrow H_2O$  (аэробное дыхание). Вполне можно подобрать такую пару, на которой может быть основана биосфера Титана. Например,  $NH_4^+ \rightarrow N_2$ ;  $NO_3^- \rightarrow N_2$  [14];  $CH_4 \rightarrow CO_2$  и обратная ей  $CO_2 \rightarrow CH_4$ ;  $SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$  и множество других. В качестве источника углерода организмы могут использовать метанол, этанол, карбонаты ( $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ), формиат ( $HCOO^-$ ). Хемолитотрофные организмы могут быть основой биосферы, снабжая органическими соединениями гетеротрофов. Астробиологи особенно часто рассматривают такие процессы, как метаногенез и метанотрофия в качестве возможных основ для внеземных биологических циклов. Возможно, метанотрофы были одними из первичных организмов и нашей планеты. В связи с большим количеством низших углеводородов, особенно метана, в составе атмосферы Титана, это вполне вероятный вариант и для спутника Сатурна. Причем, продукты жизнедеятельности метанотрофов могут использоваться для своей жизнедеятельности метаногенами, что приводит к замкнутому циклу.

Лимиты для земных организмов, которые ограничивают их способность выживать в экстремальных условиях: 1) температура: от 253 до 394 К; 2) активность воды (a): от 0.6 до 1.0; 3) кислотность (pH): от 0 до 13; 4) давление: от 0 до 1100 бар.

Второй заметный кандидат в системе Сатурна на обладание подледным океаном – это Энцелад. Анализ данных, полученных зондом «Кассини» позволил предположить существование внутреннего жидкого океана, толщиной более 10 км, покрытого относительно тонкой (30–40 км) ледяной корой [21]. Оценки общего объема такого океана доходят до 40% от объема всего спутника [22]. Кроме того, было высказано предположение, что толщина ледяной коры может быть непостоянной и значительно утоньшаться, например, на Южном полюсе спутника, вплоть до нескольких километров. Практическим доказательством этого предположения стали обнаруженные зондом гейзеры, максимальная активность которых отмечена именно на Южном полюсе. По данным масс-спектрометра INMS, установленного на борту «Кассини», вещество гейзеров состоит из воды (93%); азота (4%); углекислого газа (3.2%); метана (1.6%) и следовых количеств аммиака, ацетилена и синильной кислоты. Обнаружение солей

натрия и калия говорит о химическом сходстве океана Энцелада с земными морями. Следы гидротермальных процессов на дне океана Энцелада были обнаружены в виде присутствия в водяных выбросах наночастиц кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Размер и состав этих частиц говорит о наличии гидротермальных реакций, идущих при достаточно высоких температурах ( $>90^\circ\text{C}$ ) [23]. Взаимодействие жидкой воды, высокой температуры и минеральных компонентов дает уникальный источник разнообразных солей и минералов для химического состава внутреннего океана.

Модель внутреннего строения еще одного спутника Сатурна, Дионы, так же говорит в пользу существования внутреннего океана толщиной до 90 км, покрытого толстой ледяной корой (100 км) [24]. Возможность существования внутренних океанов или в прошлом, или в настоящее время была озвучена и для других спутников Сатурна, Реи и Япета [25].

### **Внешние области Солнечной системы**

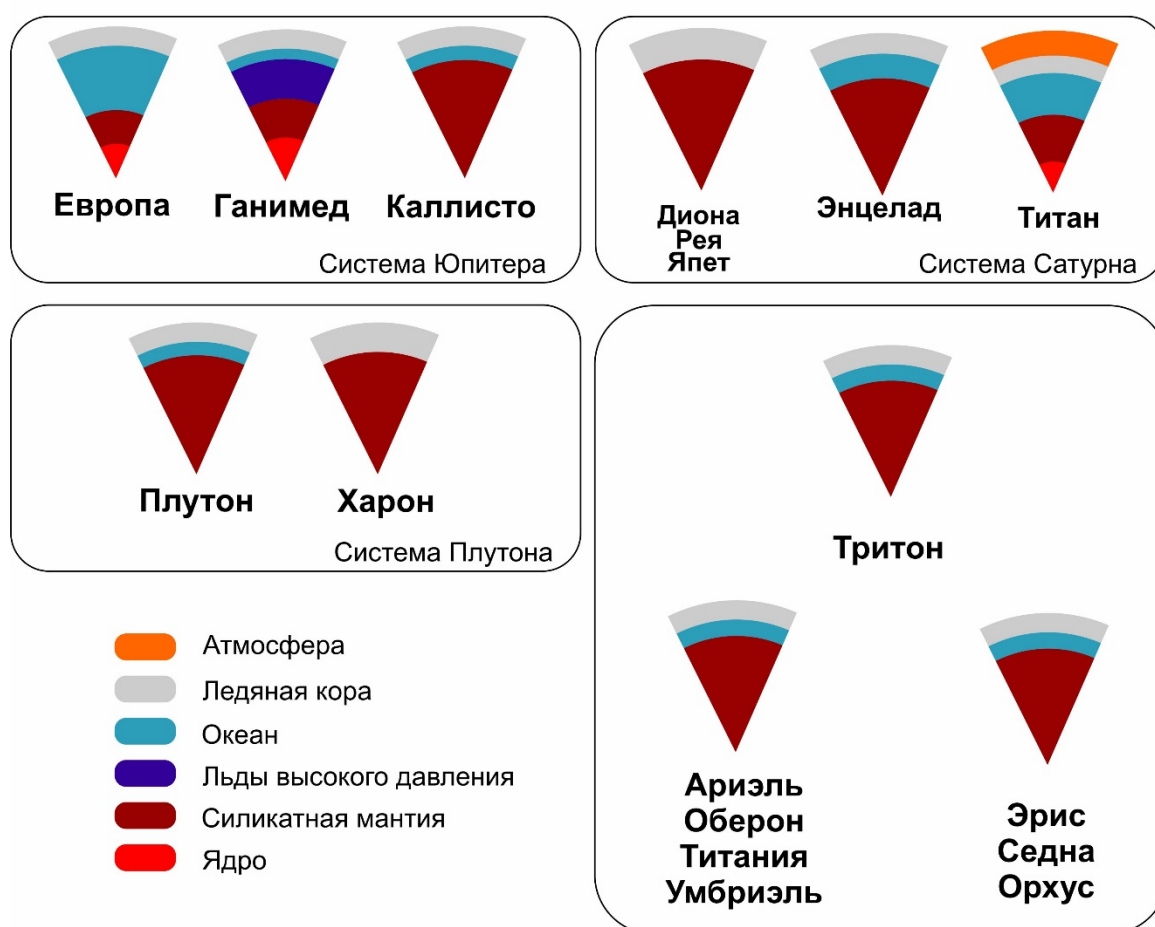
Потенциально обитаемые миры можно обнаружить и во внешних областях Солнечной системы, за орбитой Сатурна. Система Урана содержит несколько таких объектов, чей потенциал обладать внутренним водным океаном достаточно высок: ледяные спутники Ариэль, Оберон, Титания и Умбриэль [25, 26]. Спутник Нептуна Тритон, представляет собой еще одно тело, на котором обнаружена активность гейзеров. В результате выбросов на поверхности образуются многочисленные темные полосы. Лед на его поверхности имеет несколько оттенков, от сине-зеленого, там, где замерз чистый азот, до красноватого в местах, где присутствуют примеси железа. В составе поверхностных льдов было зафиксировано наличие аммиака – важного антифриза, необходимого для поддержания внутреннего океана в жидком состоянии [27]. На поверхности Тритона мало ударных кратеров, что говорит о геологической активности спутника. Зафиксированы следы криовулканической активности. По расчетам [25], глубина подледного океана Тритона может достигать 190 км.

Другие карликовые планеты внешней области, такие как Плутон, Харон, Эрис, Седна и Орхус, так же попадают в категорию потенциально обитаемых миров [25, 28] из-за возможности существования глубинного океана. Гравитационные взаимодействия в системе Плутон–Харон могут поддерживать наличие океана внутри обоих тел [29]. Хотя, по некоторым расчетам, для существования незамерзающего океана достаточно и одного радиогенного тепла ядра планеты. На поверхности Плутона отмечены и следы криовулканизма [30]. Полоса каньонов на поверхности Харона протяженностью около 1800 км и глубиной до 7.5 км явно говорит о существовании океана в прошлом спутника, который, скорее всего, замерз из-за недостаточности радиогенного тепла.

Даже некоторые тела из пояса астероидов могли иметь подледные внутренние океаны. В качестве примера можно рассмотреть Цереру. При

диаметре около 950 км Церера является крупнейшим и наиболее массивным телом в поясе астероидов. Сферическая форма карликовой планеты, её плотность (около 2.1) говорят о том, что она имеет в своем составе от 17 до 30% водного льда по массе, и её недра дифференцированы [31]. Лёд обнаружен и на поверхности планетоида, наряду с множеством гидратированных, глинистых минералов и карбонатов [32]. Данные, полученные спектрометром на борту аппарата «Dawn», указывают на наличие большого количества органических соединений на поверхности Цереры [33]. Яркие пятна на снимках теневой стороны оказались замерзшими озерами на дне кратеров, образованных в результате падения метеоритов.

*Потенциально обитаемые ледяные спутники*



Внутренний нагрев, особенно от радиоактивного распада, привел на ранних этапах эволюции астероида к расплавлению большого количества льда и образованию внутреннего океана, аналогичного океанам спутников планет-гигантов. Циркулирующая теплая вода воздействовала на исходные силикаты, что приводило к образованию разнообразных глинистых минералов. В процессе потери тепла, внутренний океан начал промерзать, но остаточные объемы жидкой воды могут оставаться внутри спутника и в настоящее время. Состав и строение поверхностного реголита явно гово-

рит в пользу подобного сценария [32]. Сегодня вода на Церере присутствует в твердом и газообразном состоянии: лед заполняет трещины в глинистой почве, а водяной пар был замечен в 2014 году космической обсерваторией Гершель.

Одновременное присутствие аммиак-содержащих гидратированных минералов, водяного льда, карбонатов и других солей, органического материала говорит об очень сложных химических условиях, крайне благоприятных для предбиологической химии.

Как мы видим, большое число объектов Солнечной системы, расположенных за пределами классической зоны обитания, могут быть потенциально обитаемы (рисунок).

Внутренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах, и существование таких возможных экосистем значительно расширяет зону обитаемости в любой планетарной системе.

#### Литература

1. *Consolmagno and Lewis* (1978) *Icarus* 34, 280.
2. *Sohl et al.* (2002) *Icarus* 157, 10–119.
3. *Kattenhorn and Prockter* (2014) *Nat. Geoscience* 7, 762–767.
4. *Kalousová et al.* (2016) *J. Geophys. Res. Planets* 121, 2444–2462.
5. *Sparks et al.* (2016) *Astrophys. J.* 829, 121.
6. *Kargel et al.* (2000) *Icarus* 148, 226–265.
7. *Dalton et al.* (2012) *J. Geophys. Res. Planets* 117, E03003.
8. *Hand et al.* (2007) *Astrobiology* 7, 1006–1022.
9. *Greenberg* (2010) *Astrobiology* 10, 275–283.
10. *Billings and Kattenhorn* (2005) *Icarus* 177, 397–412.
11. *Vance et al.* (2016) *Geophys. Res. Lett.* 43, 4871–4879.
12. *Nagel et al.* (2004) *Icarus* 169, 402–412.
13. *Simakov* (2004) Possible biogeochemical cycles on Titan. In: Seckbach, J. (Ed.) *Origins: Genesis, Evolution and Diversity of Life*. Kluwer, pp. 645–665.
14. *Simakov* (2000) Dinitrogen as a possible biomarker for exobiology: The case of Titan. In: Lemarchand, G.A. and Meechs, K.J. (Eds) *Bioastronomy'99: A new era in Bioastronomy*, Sheridan Books, pp. 333–338.
15. *Rundquist and Sobolev* (2002) *Earth–Science Reviews* 58, 143–161.
16. *Lopes, et al.* (2007) *Icarus* 186, 395–412.
17. *Artemieva and Lunine* (2005) *Icarus* 175, 522–533.
18. *Raulin* (2008) *Space Sci. Rev.* 135, 37–48.
19. *Neish et al.* (2010) *Astrobiology* 10, 337–347.
20. *Brasse et al.* (2017) *Astrobiology* 17, 8–26.
21. *Iess et al.* (2014) *Science* 344, 78–80.
22. *Cadek et al.* (2016) *Geophys. Res. Lett.* 43, 5653–5660.
23. *Hsu et al.* (2015) *Nature* 519, 207–210.
24. *Beuthe et al.* (2016) *Geophys. Res. Lett.* 43, 10088–10096.
25. *Hussmann et al.* (2006) *Icarus* 185, 258–273.
26. *Vance et al.* (2007) *Astrobiology* 7, 987–1005.
27. *Clark et al.* (2014) *Rev. Mineral. Geochem.* 78, 399–446.
28. *Rhoden et al.* (2015) *Icarus* 246, 11–20.

29. *McKinnon et al.* (2016) *Nature* 534, 82–86.
30. *Moore et al.* (2016) *Science* 351, 1284–1293.
31. *Thomas et al.* (2005) *Nature* 437, 224–226.
32. *Prettyman et al.* (2016) *Science* 354, 55–59.
33. *De Sanctis et al.* (2017) *Science* 355, 719–722.

## *Chapter 26*

### **PHYSICAL CONDITIONS AND EXOBIOLOGY POTENTIAL OF ICY SATELLITES OF THE GIANT PLANETS**

© **M.B. Simakov**

*Institute of Cytology RAS, St. Petersburg, Russia*

All giant planets of the Solar system have a big number of satellites. A small part of them consist very large bodies, quite comparable to planets of terrestrial type, but including very significant share of water ice. Galileo spacecraft has given indications, primarily from magnetometer and gravity data, of the possibility that three of Jupiter's four large moons, Europa, Ganymede and Callisto have internal oceans. Formation of such satellites is a natural phenomenon, and satellite systems definitely should exist at extrasolar planets. The most recent models of the icy satellites interior lead to the conclusion that a substantial liquid layer exists today under relatively thin ice cover inside. The putative internal water ocean provide some exobiological niches on these bodies. We can see all conditions needed for origin and evolution of biosphere – liquid water, complex organic chemistry and energy sources for support of biological processes – are on the moons. The existing of liquid water ocean within icy world can be consequences of the physical properties of water ice, and they neither require the addition of antifreeze substances nor any other special conditions. On Earth life exists in all niches where water exists in liquid form for at least a portion of the year. Possible metabolic processes, such as nitrate/nitrite reduction, sulfate reduction and methanogenesis could be suggested for internal oceans of Titan and Jovian satellites. Excreted products of the primary chemoautotrophic organisms could serve as a source for other types of microorganisms (heterotrophes). Subglacial life may be widespread among such planetary bodies as satellites of extrasolar giant planets, detected in our Galaxy.

*Глава 27*

**ИСТОРИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ  
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И КЛИМАТ ЗЕМЛИ**

© Ю.А. Наговицын

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Санкт-Петербург, Россия*

В последнее десятилетие появилось новое понятие – Космический климат, которое представляет собой распространение понятия Космической погоды на длинные времена (десятки – тысячи лет). Более конкретно, это весь комплекс внешних по отношению к Земле космических факторов, главным образом, Солнца и солнечной активности (СА), способных влиять на длительные земные процессы, в частности, на изменения климата. Одним из основных вопросов, возникающих еще до выявления физического механизма этого влияния, – каков его фактический характер? Для ответа на него необходимы, прежде всего, надежные исторические реконструкции и климата, и СА.

Излагается авторский подход к нахождению поведения СА в прошлом. На основе построенных реконструкций и имеющихся реконструкций климата получено, что солнечная активность действительно влияет на климат (в среднем вклад СА =  $17 \pm 5$  %), причем дифференциально в зависимости от временных шкал: 0–25 лет – вклад СА ~3–5%; 25–100 лет – вклад СА <  $17 \pm 5$ %; >100 лет – вклад СА ~30–40 %; ~400 лет – максимальный вклад; 1000–1500 лет – снижение – 5–10%; на временах порядка цикла Хольстатта и больше вклад снова растет.

Проблема изменений климата Земли – одна из острейших, стоящих перед человечеством. Межправительственная группа экспертов по изменению климата ИРСС констатирует: «Потепление климатической системы является неоспоримым фактом, и, начиная с 1950-х годов, многие наблюдаемые изменения являются беспрецедентными в масштабах от десятилетий до тысячелетий. Произошло потепление атмосферы и океана, запасы снега и льда сократились, уровень моря повысился, концентрации парниковых газов возросли» [1]. С 1910 года средняя глобальная температура возросла приблизительно на 1 градус Цельсия. Основным фактором глобального потепления ИРСС видит техногенный: увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере вследствие промышленной деятельности цивилизации. Произведенное ИРСС моделирование дает увеличение глобальной температуры к концу текущего столетия на целых 4 градуса. Это уже приближается к разности температур между оледенениями и межледниковьями.

Заметим, что в моделях, произведенных ИРСС, не учитываются изменения, связанные с Солнцем: поток солнечного излучения – и, естественно, солнечная активность – задаются постоянными.

## 1. Обоснование исследования

Мы не можем отрицать следующее.

– Одним из основных *космических* факторов, воздействующих на Землю, является Солнце и с ним – солнечная активность (СА).

– Известно, что солнечная активность оказывает влияние на целый ряд земных процессов (направление – космическая погода).

– Солнечно-земные связи надежно зафиксированы для *короткой* временной шкалы (изменения в гелиосфере, магнитосфере Земли, вызванные солнечной активностью).

Таким образом, задача, которую мы ставим, формулируется так: может ли солнечная активность воздействовать на *длительные* земные процессы, а именно, – климат, т.е. быть одним из климатообразующих факторов?

Для ответа на этот вопрос мы будем использовать фактические данные об изменениях солнечной активности и климата Земли.

## 2. Проблема «Космический климат»

Вначале дадим несколько определений.

*Солнечная активность* – изменения магнитного поля Солнца на различных пространственных и временных масштабах.

*Космическая погода* – весь комплекс внешних по отношению к Земле космических факторов, способных влиять на земные процессы на короткой временной шкале.

Обобщая понятие «космическая погода» на длительные времена, вводится понятие «*космический климат*», которому можно дать несколько рабочих определений. Это:

– долговременные тенденции Космической Погоды;

– совокупность солнечно-земных связей, действующих на длительных временах;

– совокупность внешних космических факторов, могущих влиять на земной климат.

Согласно [2] и др., основные цели наших исследований в рамках проблемы космического климата следующие:

– Получение физически информативных комплексных данных о динамике солнечного магнитного поля, геомагнитного поля и межпланетного магнитного поля на больших временных масштабах.

– Качественный и количественный анализ эволюции солнечной активности на основе реконструкций поведения различных компонент магнитного поля Солнца на длительных временах.

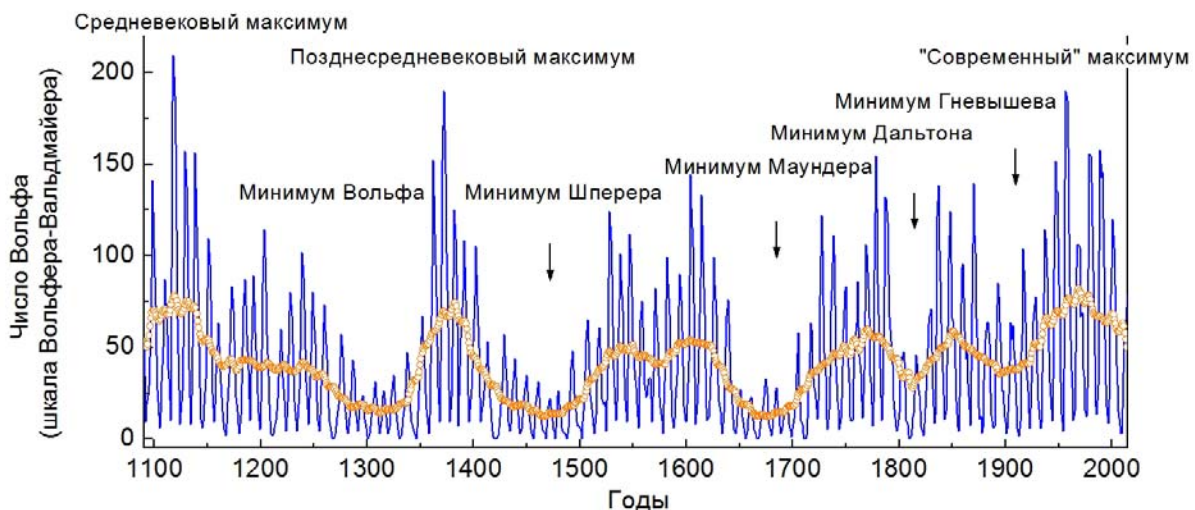
– Исследование прогностических сценариев вариаций активности Солнца на интервале десятков – сотен лет.

– Исследование связи солнечной активности и климата Земли.

Следующие два раздела будут посвящены достижению соответственно первой и последней из этих целей. Естественно, что если мы хотим изучать солнечно-климатические связи, мы должны обладать данными и о климате, и о солнечной активности. В работе мы используем имеющиеся данные разных авторов о климатических изменениях и собственные – о СА.

### 3. Исторические реконструкции солнечной активности

Необходимость рассмотрения поведения параметров солнечной активности в длительном аспекте вытекает из мультициклического характера процесса СА: кроме 11-летнего (цикла Швабе-Вольфа), по самым разным данным выявляются 80-90-летний и 200-летний циклы. Эти циклы, называемые циклами Гляйсберга и Зюсса соответственно, образуют яркую картину грандиозных максимумов и минимумов солнечной активности – рисунок 1.



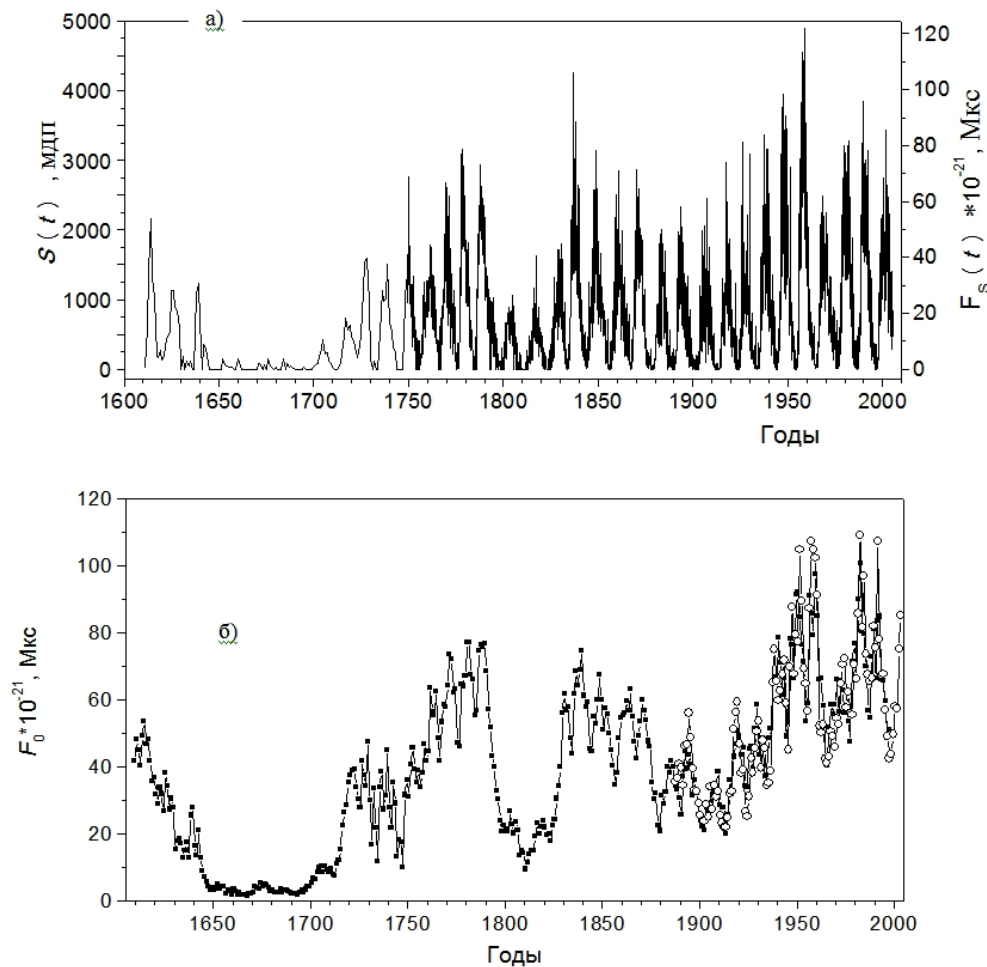
**Рис. 1.** Грандиозные максимумы и минимумы солнечной активности. Реконструкция по [2].

Основу нашего подхода составляет рассмотрение СА и солнечно-земных связей на основе «временных шкал», выделяемых в соответствии с возможностями использования для реконструкций тех или иных данных. В применении к СА могут быть выделены следующие (последовательно вложенные друг в друга) шкалы:

- а) шкала 100–150 лет – прямые регулярные наблюдения СА (геомагнитной активности и климатических параметров);
- б) шкала 400 лет – нерегулярные прямые наблюдения СА;
- в) шкала 1000–2000 лет – набор косвенных данных о солнечной активности (хроники полярных сияний; пятен, замеченных невооруженным глазом; радионуклиды в природных архивах; археомагнитные данные);

г) шкала 10000 лет – данные о концентрации радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  и бериллия-10 в датированных образцах (кольцах деревьев и полярных льдах соответственно) – следствия т.н. эффекта Де Врие.

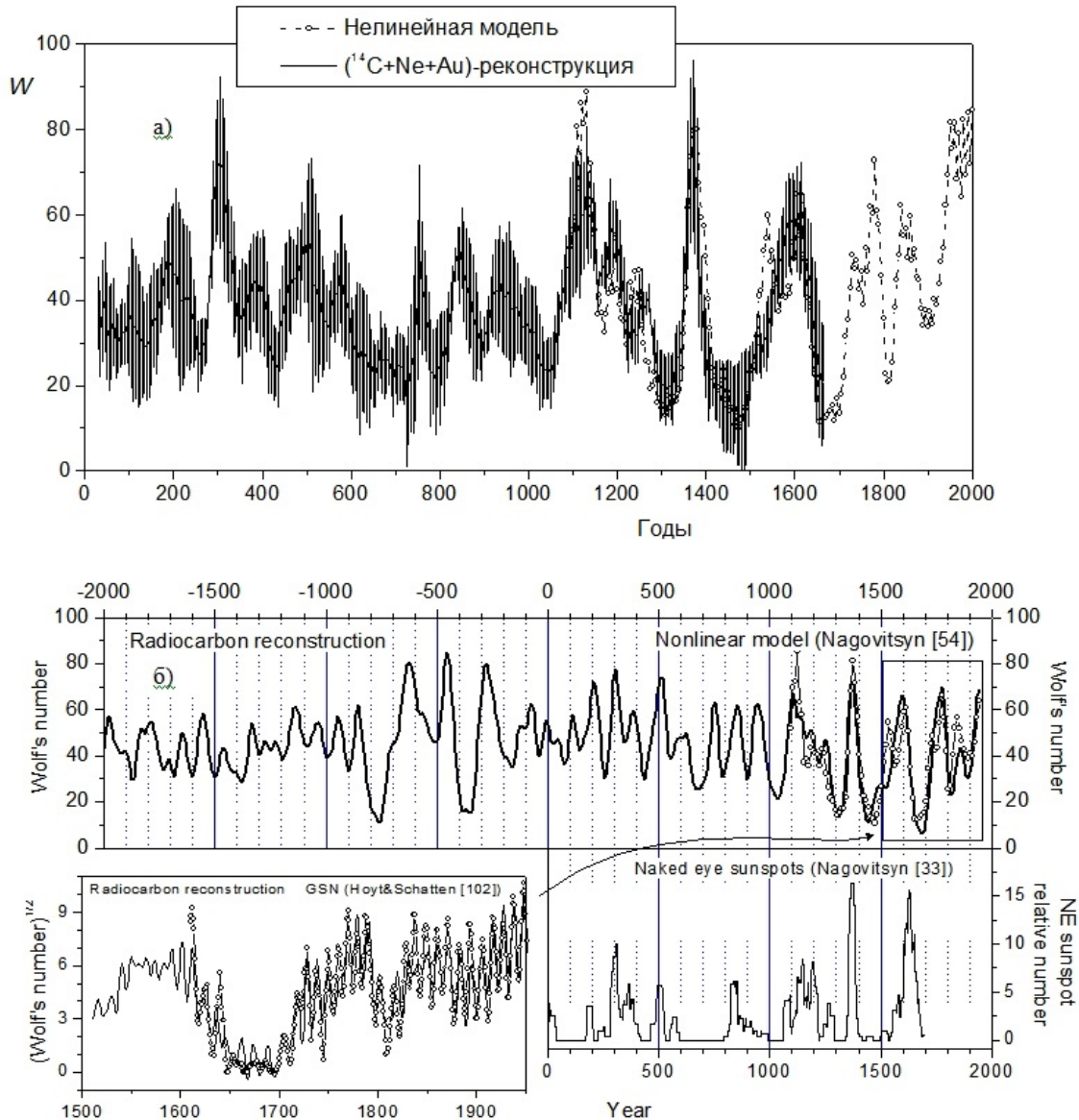
По [3] в общем виде проблема реконструкции в контексте подхода сводится к следующей задаче. Пусть  $X(t), Y(t)$  – два временных ряда, заданных на интервалах  $[t_0, t_a]$  и  $[t_b, t_a]$ ,  $0 < b < a$ , соответственно. Последний интервал является общим для рядов. Предположим, что для этого интервала существует связь  $F(X, Y) = 0$ . Если  $F$  достаточно гладкая и одна из производных, например,  $F_y = \partial F / \partial y \neq 0$ , то существует функция  $Y = f(X)$ .



**Рис. 2.** а) Ряд суммарной площади пятен в гринвичской системе (в миллионных долях полусферы)  $S(t)$  и полного абсолютного пятенного магнитного потока (в Максвеллах)  $\Phi_{\Sigma}(t)$ : 1610–1749 гг. – среднегодовые значения, 1750–2004 – среднемесячные, по [9]. б) Открытый магнитный поток Солнца для 400-летней шкалы – среднегодовые значения [3].

Реконструкция предполагает два этапа, первый из которых состоит в построении аппроксимации  $\hat{f} \approx f$  на  $[t_b, t_a]$ , а второй – в экстраполяции  $Y$

на интервал  $[t_0, t_b]$ . Заметим, что часто для построения аппроксиматора можно использовать лишь часть  $[t_i, t_j] \subset [t_b, t_a], a \leq i < j \leq b$  общего интервала, поскольку другая часть необходима для верификации связи.



**Ри**

**с. 3. а)** Среднедекадная реконструкция числа Вольфа за последние 2000 лет, основанная на концентрации радиоуглерода в датированных образцах  $^{14}\text{C}$ , пятнах, замеченных невооруженным глазом Ne, и полярных сияниях Au [2], а также нелинейная модель [7]. Вертикальные линии – доверительные интервалы; **б)** Среднедекадная радиоуглеродная реконструкция числа Вольфа [8] в сравнении с нелинейной моделью и реконструкцией относительного числа пятен, замеченных невооруженным глазом. Левая нижняя панель – реконструкция 11-летних циклов по радиоуглеродным данным

В задачах реконструкции, а также в других задачах, имеющих отношение к связям между параметрами различных природных процессов, необходимо учитывать возможность дифференциального характера этих

связей на разных типичных временных масштабах развития данных процессов (т.е. в случаях, когда примитивная глобальная линейная регрессия становится неприменимой). Для этого предложены два метода [4].

Первый – метод кратномасштабных регрессий (Multi-Scale Regression method – MSR). Этот метод, как и следующий, позволяет выявлять и учитывать возможные соотношения между рядами, имеющими различную – но значимую – связь для разных временных шкал. Он основан на построении многомерных линейных моделей в пространстве вейвлет-коэффициентов рядов с последующим обратным вейвлет-преобразованием.

Второй – метод разложения по псевдофазовому пространству (method of Decomposition in terms of pseudo-Phase Space – DPS). Он вытекает из подхода Такенса [5], установившего, в частности, связь динамических систем (здесь мы полагаем, что рассматриваемые нами процессы могут быть описаны системами дифференциальных уравнений) с авторегрессионными моделями (Малинецкий, Потапов, [6]).

В работах [2–4, 7–10] и других были получены реконструкции солнечной активности и связанных с ней параметров для различных временных шкал. Некоторые из них приведены на рисунках 2, 3.

Эти и другие реконструкции были нами применены для исследования вклада солнечной активности в изменения климата Земли.

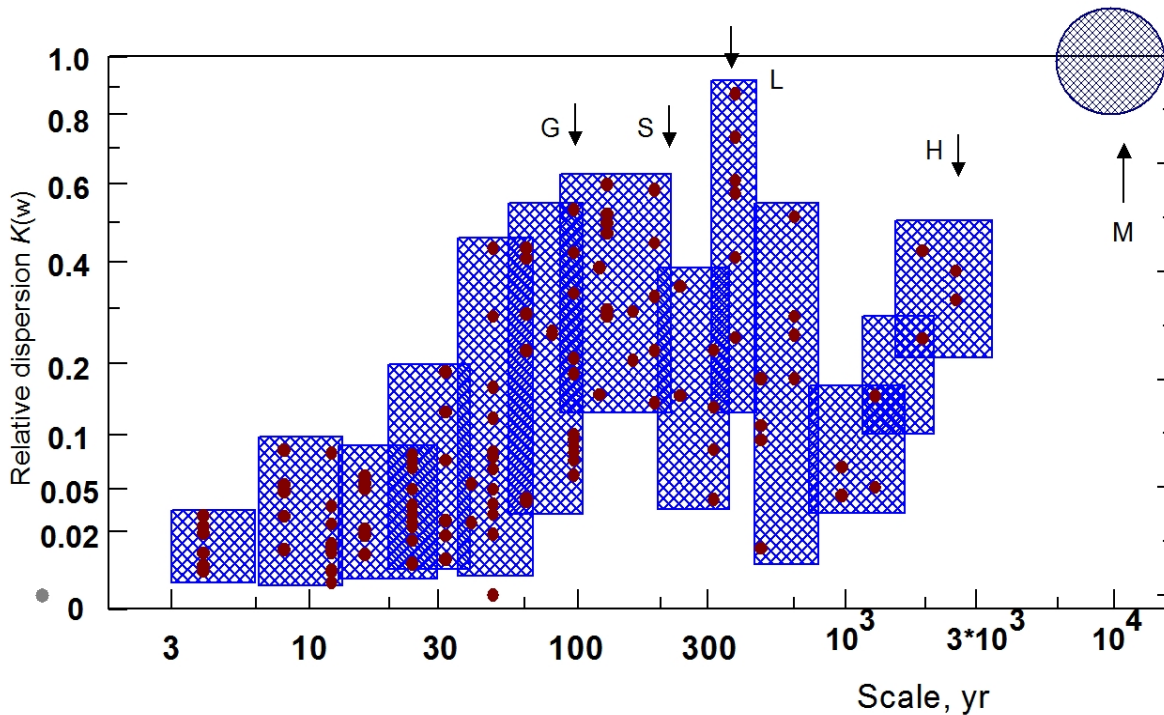
#### **4. Солнечная активность и климат Земли**

Следуя [11, 12], определим, какую математическую модель мы будем использовать для нахождения вклада солнечной активности  $S(t)$  в изменения климата Земли  $T(t)$ . Естественно, что, как и в случае с реконструкциями солнечной активности на длительных временах, необходимо учесть тот факт, что искомая связь может быть различной для разных временных шкал. Поэтому простые модели вида  $T(t) = aS(t) + b$  или  $T(t) = aS(t - \Delta) + b$  не могут нас удовлетворить. Действительно, солнечная активность развивается на ряде типичных частот (имеет конечное число колебательных степеней свободы). Земным климатообразующим факторам: атмосфере, гидросфере, литосфере, криосфере и биосфере, – можно, например, по аналогии с задачей баланса радиоуглерода [8] сопоставить соответствующие «резервуары», обменивающиеся энергией, полученной от Солнца, между собой. Имея ввиду сказанное, в [11, 12] предлагается в качестве модели связи следующая:

$$T(t, \omega) = a(\omega)S(t, \omega) + b(\omega)\dot{S}(t, \omega) + c(\omega), \quad (1)$$

которая, несмотря на достаточную простоту, описывает широкий класс взаимодействий: различную зависимость от типичных времен (частот) квазипериодического воздействия, возможность запаздывания ответа на сиг-

нал (из-за временной производной в правой части). Ограниченность модели определяется главным образом невозможностью учесть в ней обратные связи влияния поступившей в резервуар тепловой энергии на коэффициенты обмена, поэтому в ней мы имеем дело со средними по выборкам коэффициентами. Однако применение модели в любом случае – прогресс по сравнению с примитивными, глобальными по частоте, моделями. Заметим, что линейный тип связи в модели (1) подразумевает, что искомая оценка будет нижней оценкой вклада.



**Рис. 4.** Изменение вклада солнечной активности в климат Земли для различных типичных времен вариаций. Стрелочками и буквами обозначены солнечные циклы: G – Гляйсберга, S – Зюсса, L – Линка (~400 лет), H – Хольстатта (~2500 лет), а также М – «орбитальные» циклы Миланковича.

Собственно решение задачи об оценке вклада вариаций  $S(t)$  в  $T(t)$  следующее. Из имеющихся выбираем ряды реконструкций  $S(t)$  и  $T(t)$ . По методу MSR (см. раздел 3) находим коэффициенты  $a(\omega), b(\omega), c(\omega)$  в (1). С их помощью строим «модельную»  $T^*(t, \omega)$  по правой части (1) для данной частоты. Находим вклад  $K(\omega)$  модельной дисперсии  $\sigma^2 T^*(t, \omega)$  в дисперсию наблюдаемых вариаций  $\sigma^2 T(t, \omega)$  для данных типичных времен (частот), а также суммарный по частотам вклад  $K_0$  как:

$$K(\omega) = \sigma^2 T^*(\omega) / \sigma^2 T(\omega), \quad K_0 = \sigma^2 T^* / \sigma^2 T . \quad (2)$$

В [11, 12] описанная процедура была проведена для времен вариаций до сотен лет. Было получено  $K_0 = 17 \pm 5\%$ ,  $K(\omega)$  мала (несколько процентов) для времен  $< 50$  лет и увеличивается до 30–40% для времен порядка циклов Гляйсберга и Зюсса.

В нашей работе мы расширили диапазон времен до нескольких тысячелетий, привлекая различные реконструкции солнечной активности и климата Земли. Полученный результат иллюстрирует рисунок 4. Мы видим, что картина по сравнению с [11, 12] для длинных циклов стала более нетривиальной.

## 5. Результаты и выводы

Таким образом, мы получили, что солнечная активность действительно влияет на климат. Ее средний вклад – по всем частотам вариаций – составляет  $K_0 = 17 \pm 5\%$ . Однако вклад дифференциален в зависимости от временных шкал. Для типичных времен 0–25 лет он составляет  $\sim 3\text{--}5\%$ , 25–100 лет –  $K(\omega) < 17 \pm 5\%$ ; 100–200 лет –  $K(\omega) \sim 30\text{--}40\%$ ; 350–450 лет –  $K(\omega) \sim 50\text{--}70\%$ ; 1000–1500 лет: снижение  $K(\omega) \sim 5\text{--}10\%$ ; 2500 лет и больше –  $K(\omega) \sim 50\%$ . Для времен порядка голоцена он должен составлять величину, приближающуюся к 100%: там в действие вступают орбитальные циклы Миланковича.

В качестве некоторого комментария к полученным результатам можно заметить следующее.

Процесс обмена поступившей от Солнца энергией между земными климатообразующими «резервуарами» напоминает с той или иной степенью загрубленности процесс дрейфа радиоуглерода в углеродной обменной системе. Поэтому, как и для радиоуглерода, высокочастотные вариации солнечной активности (с периодами до 25 лет) обменной системой в климате подавлены. В то же время возрастание вклада СА до десятков процентов для более продолжительных времен и локальное повышение вклада для времен, соответствующих солнечным циклам Гляйсберга, Зюсса, Линка и Хольстатта, ясно свидетельствует о том, что солнечная активность действительно является климатообразующим фактором.

Для шкалы 25–100 лет по [13] климатическая система Земли состоит из атмосферы, *деятельного* (поверхностного) слоя Океана, сезонного снежного покрова, морского льда; внешние воздействия создаются потоком солнечной энергии, парниковыми газами, фоновым состоянием глубокого Океана и др.

Для длительных шкал (сотни – тысячи лет) по [13] в климатическую систему входит *весь Океан* – основной резервуар  $\text{CO}_2$  на Земле – с последствиями для глобальной карбонатной системы, определяющими, в частности, содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере и парниковый эффект. Первоначальный

прогрев Океана приводит к выносу CO<sub>2</sub> в атмосферу, охлаждение – к поглощению.

Таким образом, особенности влияния солнечной активности на земной климат (для вариаций менее 100 лет – слабое и более 100 лет – сильное) можно связать с действием Океана, усиливающего или ослабляющего воздействие солнечной активности – в ее длительных циклах – на Землю.

С физической точки зрения механизм воздействия солнечной активности на климат до сих пор не ясен. Однако мы надеемся, что наша работа прояснит фактическую сторону проблемы.

### Литература

1. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Резюме для политиков // МГЭИК, М: 2013.
2. *Nagovitsyn, Yu.A.* Global solar activity on long time scales, *Astrophysical Bulletin*, 2008, vol. 63, Issue 1, pp.43–55.
3. *Nagovitsyn Yu.A.; Miletsky E.V.; Ivanov V.G.; Guseva S.A.* Reconstruction of space weather physical parameters on 400-year scale, *Cosmic Research*, 2008, vol. 46, Issue 4, pp. 283–293.
4. *Nagovitsyn Yu.A., Ivanov V.G., Miletsky E.V., Volobuev D.M.*, ESAI data base and some properties of solar activity in the past, *Solar Phys.*, 2004, vol. 224, No 1–2, pp. 103–112.
5. *Takens F.*, Detecting Strange Attractors in Turbulence, *Lect. Notes Math.*, 1981, vol. 898, pp. 336–381.
6. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.*, Современные проблемы нелинейной динамики, М.: Эдиториал УРСС, 2000.
7. *Наговицын Ю.А.*, Нелинейная математическая модель процесса солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом, *Письма в Астрон. журн.*, 1997, т. 23, № 11–12, с. 851–858.
8. *Volobuev D.M., Nagovitsyn Yu.A., Jungner H., Ogurtsov M.G., Ivanov V.G., Miletsky E.V.*, Holocene <sup>14</sup>C production rate and solar activity, *Proceedings of IAU Symposium No 223. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*. St. Petersburg. 2004, pp. 565–566.
9. *Наговицын Ю.А.*, К описанию долговременных вариаций магнитного потока Солнца: индекс площадей пятен, *Письма в Астрон. журн.*, 2005, т. 31, № 8, с. 622–627.
10. *Наговицын Ю.А.*, Циклы солнечной активности во время маундеровского минимума, *Письма в Астрон. журн.*, 2007, т. 33, № 5, с. 385–391.
11. *Наговицын Ю.А.* Влияние солнечной активности на изменения климата Земли: оценка нижнего предела / *Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции*. *Астрономическое общество, М.: 2010, с. 219–222.*
12. *Nagovitsyn Yu.A.* Specific features in the effect of solar activity on the Earth's climate changes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, vol. 54, Issue 8, pp.1010–1013.
13. *Кислов А.В.* Климат в прошлом, настоящем и будущем, М.: Интерпериодика, 2001.

*Chapter 27*

**HISTORICAL RECONSTRUCTIONS OF SOLAR ACTIVITY  
AND THE EARTH'S CLIMATE**

© **Yu.A. Nagovitsyn**

*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St.-Petersburg, Russia*

In recent decades the new concept of “Space Climate” appeared, which refers to extension of the concept of Space Weather to long time ranges (from decades up to millennia). More specific, the Space Climate is the whole complex of external (with respect to the Earth) space factors, mostly caused by the Sun and solar activity (SA) that is able to influence on long-term terrestrial processes, in particular, on variation of the climate. One of principal questions that arise before understanding of physical mechanisms of this influence is "What is its actual character?" To answer the question, first of all, one must have reliable historical reconstructions both of the climate and SA. The author's approach to obtaining of SA behavior in the past is described in the paper. On the base of the built and available reconstructions of the climate it is shown that solar activity really affects the climate (on the average the contribution of SA is  $17\pm 5\%$ ), being different for different time scales: for the scale 0–25 years it is  $\sim 3\text{--}5\%$ ; for 25–100 years  $< 17\pm 5\%$ ; for  $> 100$  years  $\sim 30\text{--}40\%$ ; for  $\sim 400$  years the contribution is maximal; for 1000–1500 years it decreases to  $5\text{--}10\%$ ; on time scales of order of the Hallstatt cycle and more the contribution increases again.

## Глава 28

# СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ТЕХНОСФЕРА

© В.Д. Кузнецов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук  
г. Москва, г. Троицк, Россия*

Дается обзор факторов солнечной активности, воздействующих на околоземное космическое пространство и техносферу. Солнечная активность в виде повышенных потоков жесткого электромагнитного и корпускулярного излучения, потоков солнечного ветра и выбросов массы рассмотрена как основной источник космической погоды, создающей опасность для космонавтов, спутников, Международной космической станции и наземных технических систем. Приводятся примеры воздействий солнечной активности на космическую и наземную техносферу.

### 1. Введение

Система Солнце–Земля на протяжении тысячелетий находится в устойчивом состоянии, определившим условия жизни цивилизации и ее технического развития. Такое устойчивое состояние Земли и окружающего космического пространства (магнитосферы, ионосферы и атмосферы) подвергается возмущениям активностью Солнца, которая меняется с 11-летним солнечным циклом и с более длительными циклами [1]. Такие факторы солнечной активности как повышенные потоки электромагнитного излучения и энергичных частиц, высокоскоростные потоки солнечного ветра, корональные выбросы массы и ударные волны (см. рис. 1), формирует космическую погоду в околоземном пространстве, приводя к изменению среды обитания человека и его деятельности.

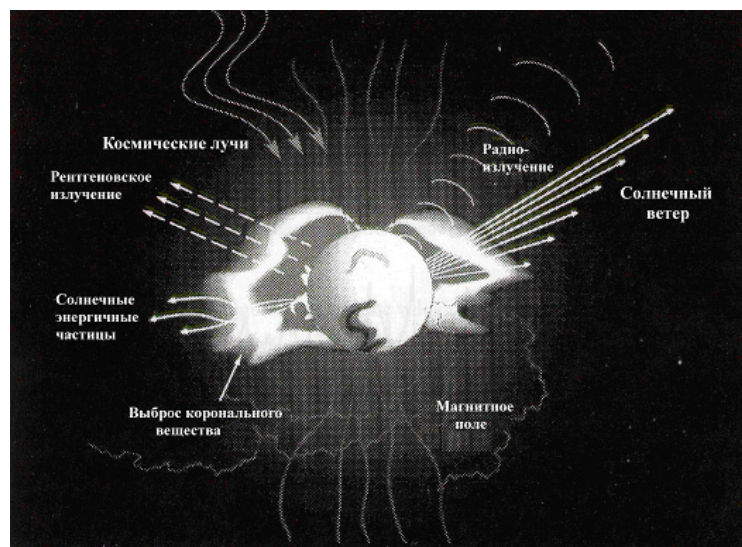
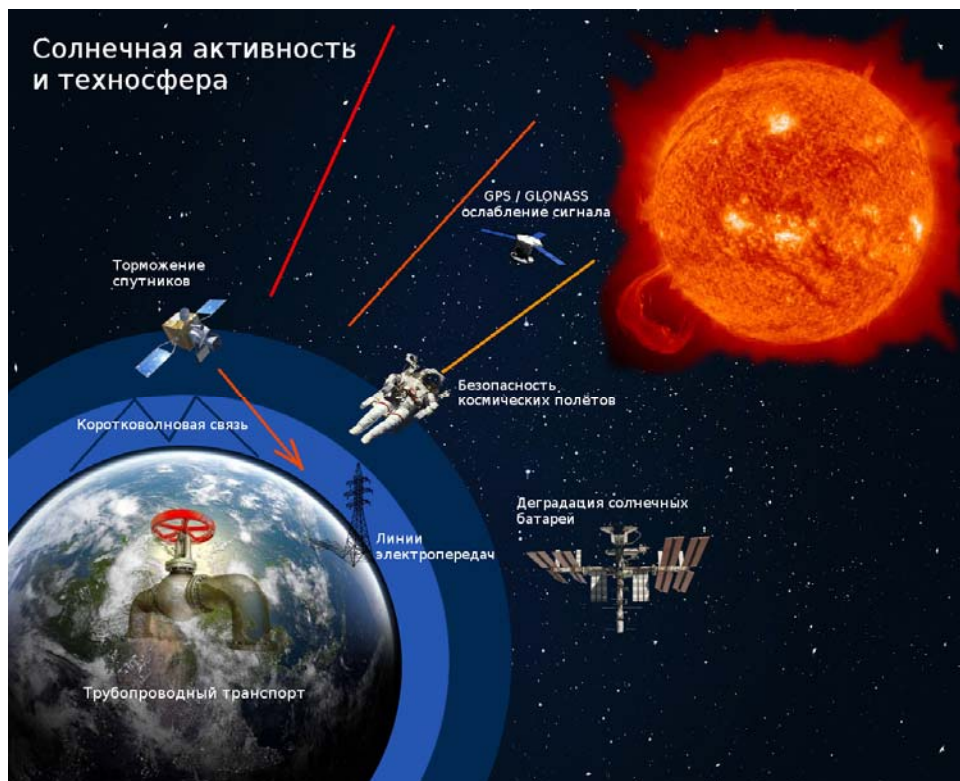


Рис. 1. Солнечные источники космической погоды (адаптировано из [2]).

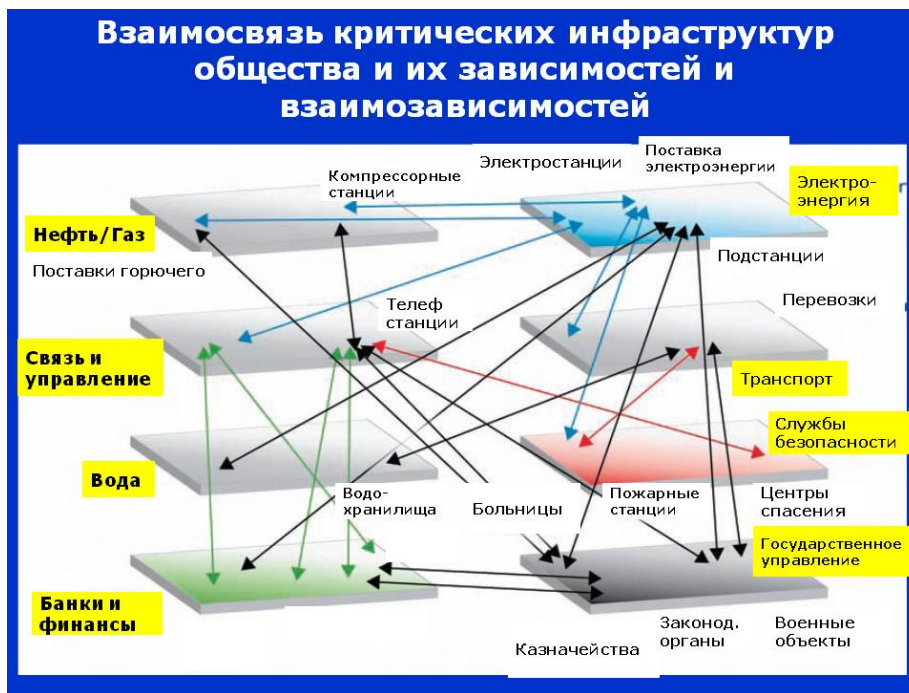
Воздействие солнечной активности на технические системы впервые было замечено в работе телеграфа в периоды магнитных бурь, а впоследствии оно было зарегистрировано в трансатлантических линиях связи и высокочастотной ионосферной радиосвязи, в протяженных линиях электропередач и трубопроводах, в работе спутников связи, телевидения и навигации [3]. Сегодня развитие техносферы общества на Земле и в космосе достигло такого состояния, когда учет воздействия на технические системы факторов солнечной активности все больше становится неотъемлемой частью их технологического изготовления и эксплуатации, и эта тенденция в силу масштабности вновь создаваемых и проектируемых технических систем имеет все возрастающее значение [4]. Учет факторов космической погоды необходим при проектировании современных технических систем на Земле (протяженные энергосистемы – линии электропередач, нефте- и газопроводы, и т.д.) и в космосе (спутники, космические коммуникационные технологии, и т.д.), а также в вопросах обеспечения безопасности, которая с ними связана [5].

Наряду со сбоями и нештатными ситуациями в работе технических систем солнечная активность прямо и опосредованно способна привести к серьезным разрушениям наземных и космических технических систем (см. рис. 2) и полному прекращению их работоспособности, как это имело место, например, в случае наземной Квебекской энергокатастрофы [6], и в большем числе случаев со спутниками разного назначения [7, 8].



**Рис. 2.** Воздействие солнечной активности на современные космические системы и технологии.

В силу взаимосвязанности критических инфраструктур общества (см. рис. 3) и их взаимозависимости уязвимость одной из них (например, энергоснабжения, связи и т.д.) по отношению к воздействиям солнечной активности будет сказываться на других (транспорт, безопасность, водоснабжение и т.д.) и способна привести к каскадному процессу отказов и, как следствие, к серьезным нарушениям в функционировании всей инфраструктуры в целом. Очевидно, что со временем, в силу интенсивного технического развития, зависимость ключевых инфраструктур от факторов космической погоды будет возрастать вместе с прямыми и косвенными угрозами для общества.



**Рис. 3.** Взаимосвязь и взаимозависимость критических инфраструктур общества (адаптировано из [7]).

## 2. Солнечные источники космической погоды

В таблице 1 суммированы основные агенты солнечной активности, которые являются источниками космической погоды (см. рис. 1). Эти воздействующие на Землю агенты имеют различные временные и амплитудные характеристики [9, 10].

К стационарным источникам относятся солнечное излучение, которое мы отождествляем с солнечной постоянной, потоки солнечного ветра, корональные дыры и так называемые коротационные взаимодействующие области.

Спорадическая компонента источников – это активные области и их повышенное излучение, вспышки, выбросы массы, ударные волны и связанные с ними повышенные потоки энергичных частиц и излучений, магнитные облака.

Отдельно следует выделить экстремальные явления – мощные выбросы массы и рентгеновские вспышки, которые сопровождаются ударными волнами, ускорением протонов до высоких энергий.

**Таблица 1.** Солнечные источники космической погоды

Источники ⇒ <hr/> Временные и амплитудные характеристики ↓	Электромагнитное излучение (от радио до $\gamma$ ) ↓	Частицы (Корпускулярное излучение)	
		Энергичные частицы ↓	Потоки плазмы с магнитным полем ↓
Стационарные (медленное меняющиеся) ⇒	Солнечный спектр (фотосфера, хромосфере, корона).	Отсутствуют или малы.	Солнечный ветер (медленный и быстрый).
Спорадические (от сек до суток) ⇒	Активные области, вспышки, транзитные явления.	Вспышки, ударные волны.	Выбросы массы. Ударные волны.
Экстремальные (по амплитуде) ⇒	Рентгеновские вспышки	Большие вспышки (протонные события, GLE-события).	Выбросы массы.

Эффект воздействия на Землю и техносферу различных агентов солнечной активности зависит от положения источников на Солнце, от ориентации магнитной оси Земли относительно линии Солнце–Земля и многих других факторов [11].

Приведенные выше основные солнечные источники космической погоды модулируются 11-летним солнечным циклом – максимальные число и интенсивность геоэффективных явлений на Солнце происходят вблизи максимума солнечного цикла, соответствующим образом меняется и космическая погода в ОКП – число магнитных бурь, радиационная обстановка и т.д. За 11-летний цикл активности на Солнце происходит около 37000 вспышек; в максимуме цикла – 12–24 вспышек в день и от 5 до 10 выбросов в день. Земля за это время испытывает более 600 магнитных бурь. Даже в минимуме солнечного цикла на Солнце происходят 1–2 вспышки в день. Помимо 11-летнего цикла солнечных пятен известны и другие более длиннопериодные солнечные циклы (80–90-летний (вековой) цикл амплитудной модуляции 11-летних циклов, 180–230-летний цикл и др.), которые необходимо иметь ввиду в плане долгосрочного прогноза ситуации в системе Солнце–Земля.

Иногда в системе Солнце–Земля случаются экстремальные явления (см. [7]), когда произошедшие на Солнце активные процессы (выбросы массы, вспышки) вызывают в околоземном пространстве очень большие амплитуды возмущений. К таким событиям относят Каррингтоновское событие 1859 г., событие 1921 г., событие августа 1972 г., Квебекское событие 13–14 марта 1989 г., события октября – ноября 2003 г. и ряд других. Во время самого мощного за все время наблюдений события 1859 года вся Земля, а не только полярные регионы, была охвачена сильными геомагнитными возмущениями и сияниями, а во время магнитной бури 1921 года скорость роста магнитного поля была в 10 раз больше, чем в Квебекском событии. Если бы такие мощные события произошли сегодня в условиях развитой техносферы, то последствия были бы катастрофическими (см., например, [12]). И такие события рано и поздно произойдут в будущем. Эти события с особой ясностью продемонстрировали уязвимость среды обитания человека и его деятельности по отношению к проявлениям космической погоды и необходимость разработки мер по смягчению негативных воздействий на техносферу.

### **3. Воздействие на наземную техносферу**

Во время магнитных бурь геомагнитно-индуцированные токи текут во всех проводящих системах, а также по земле, проникая в энергосистемы через незащищенные заземления и вызывая разрушения трансформаторов и отключение электроэнергии.

Прямые угрозы создаются для таких объектов как линии электропередач и электростанции, ж/д линии электроснабжения и автоматики, нефте- и газопроводы, линии связи. Чем больше пространственный масштаб энергосистемы, тем сильнее эффект воздействия.

Первая крупномасштабная энергетическая катастрофа из-за космической погоды произошла 13–14 марта 1989 года [6], когда во время мощной магнитной бури, вызванной выбросами массы из Солнца, провинция Квебек с населением в 6 млн. чел, включая столицу Канады Оттаву, на 9 часов была отключена от электроэнергии. Из-за наведенных геомагнитно-индуцированных токов вышел также из строя повышающий трансформатор на ядерном заводе в Нью-Джерси, остановились металлоплавильные заводы и другие непрерывные производства. Общий ущерб составил около 2 млрд. долларов.

Нефтяные и газовые трубопроводы также подвержены воздействиям со стороны геомагнитно-индуцированных токов [13] (рис. 4). Примером может служить регулярная регистрация таких токов в Аляскинском трубопроводе, где величина их может достигать сотни ампер. Изменяя электрический потенциал трубы, индуцированные токи нарушают систему защиты от коррозии, заметно уменьшая срок службы трубопровода и создавая нештатные ситуации в его работе.

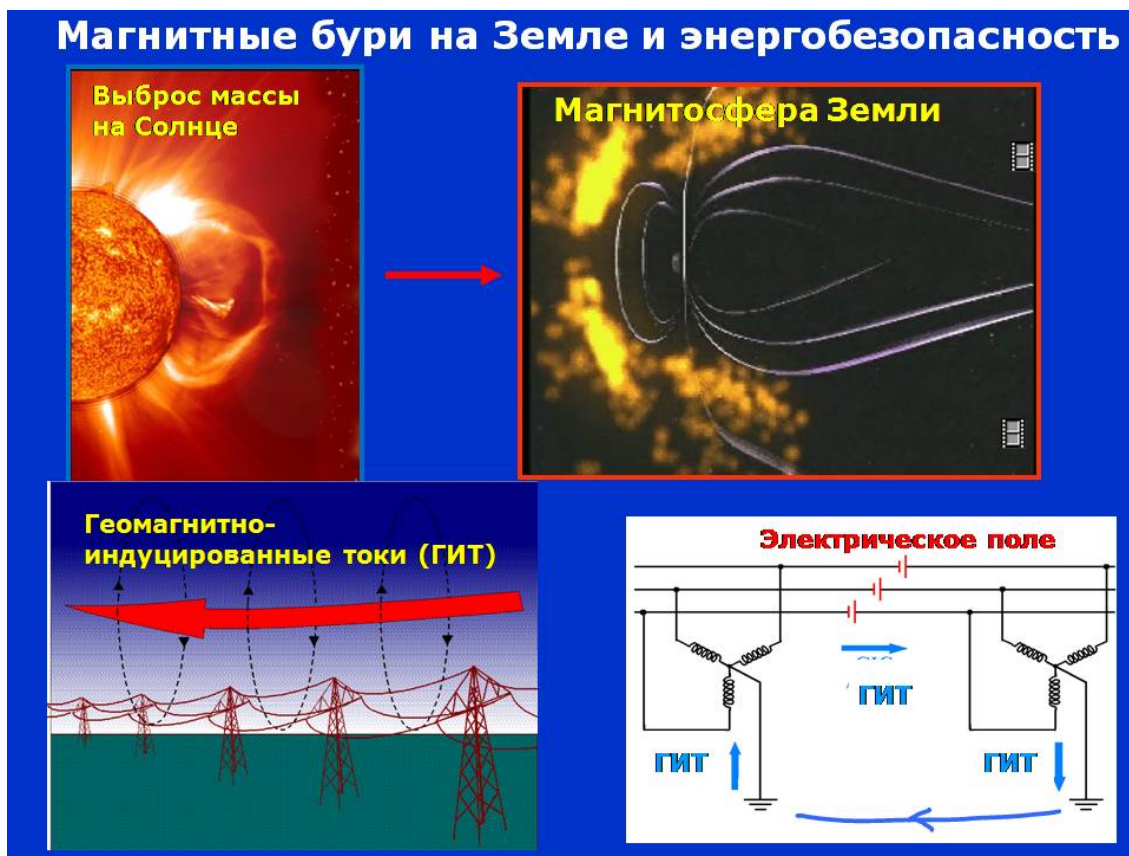


Рис. 4. Геомагнитно-индуцированные токи и их воздействие на объекты энергоинфраструктуры.

В периоды повышенной геомагнитной активности, преимущественно в северных регионах, сбои возникают также в работе электроники железнодорожного транспорта, которые приводят к нештатной работе светофоров и связанной с этим опасности аварий.

#### 4. Воздействие на космическую техносферу

Космическая инфраструктура – Международная космическая станция и космические системы – также подвергаются серьезным рискам со стороны космической погоды [7, 8]. Космическая радиация нарушает работу электроники спутников и системы управления ракетоносителей, создает опасность для космонавтов. Находящаяся на геостационарной орбите огромная группировка космических спутников (рис. 5) оценивается в более чем 200 млрд. долларов, и она находится под постоянным воздействием опасных факторов космической погоды, создавая высокие потенциальные риски, связанные с нарушением телефонной и интернет связи, телевидения и т.д.

Мощные выбросы массы из Солнца способны поджать дневную границу магнитосферы до пяти земных радиусов, в результате чего все геостационарные спутники, а также спутники на более удаленных орбитах, оказываются вне магнитосферы Земли, в открытом космосе, подвергаясь

прямому воздействию солнечных энергичных частиц, что помимо радиационного воздействия на электронику сопровождается засветкой оптической аппаратуры, в частности, ослеплением датчиков звездной ориентации, что приводит к потере ориентации спутников. В периоды магнитных бурь в отдельных регионах земного шара точность позиционирования систем GPS/ГЛОНАСС падает от 1 м до 100 метров, что также создает нештатные ситуации и риски для авиации и определения местоположения объектов и судов. Во время Квебекского события 1989 года многие спутники американской системы определения местоположения – прообразы нынешних систем GPS и ГЛОНАСС, были потеряны или вышли из строя.



Рис. 5. Группировка спутников на геостационарной орбите (адаптировано из [7]).

В периоды сильных магнитных бурь из-за разбухания атмосферы Международная космическая станция теряет высоту орбиты быстрее обычного, примерно на 7–10 км. Возникает необходимость поднятия орбиты и доставки топлива на МКС, что требует времени, дополнительных затрат, и создает угрозу для самой станции.

### 5. Заключение

Таким образом, космическая погода уже предупредила общество, что наши технические системы на Земле и в космосе достигли такого масштаба развития, что они ощущают на себе воздействие ее факторов, а мощ-

нейшие проявления космической погоды, которые имели место в прошлом и неизбежно произойдут в будущем, способны привести к крупномасштабным катастрофам и большим ущербам. Особенность состоит в том, что наряду с редкостью экстремальных событий космической погоды, они могут привести к глобальным и тяжелым последствиям. Принятие адекватных мер защиты – это задача цивилизованного общества, задача которую необходимо решать. В этой связи уместно отметить принятые в США законодательный акт по координации усилий в подготовке к событиям космической погоды [14], целую серию международных инициатив и стратегий по космической погоде [15–17], а также актуальность и обсуждение проблематики в Российской Федерации [18, 19].

Для обеспечения устойчивого функционирования техносферы необходимы прогнозы характеристик предстоящих солнечных циклов, периодов повышенной активности Солнца, а также разработка мер по смягчению негативных воздействий космической погоды на сферы человеческой деятельности. Исследования по проблемам солнечно-земной физики [20], которая является научной основой для изучения и предсказания космической погоды, позволят продвинуться в ключевых вопросах науки о космической погоде – понимании механизма солнечных циклов, триггерных механизмов наиболее мощных проявлений солнечной активности – вспышек и выбросов массы, а также в прогнозировании аномальных солнечных событий, представляющих реальную опасность для современной техносферы. Разработанные международным сообществом рекомендации по вопросам космической погоды включают развитие и интеграцию сетей наблюдений разных стран, всеобъемлющий мониторинг космической погоды, открытый доступ к данным наблюдений, разработку и использование физических моделей, использование наилучших практик парирования угроз от космической погоды, и т.д.

#### Литература

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная\\_активность](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_активность)
2. *L.J. Lanzerotti, C.G. MacLennan, D.J. Thomson*. Engineering issues in space weather // In: *Modern Radio Science*. – ed. *M.A. Stuchly*. – International Union of Radio Science. Oxford Univ. Press, 1999.
3. *Bothmer M., Daglis I.* A Space Weather – Physics and Effects (Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2007).
4. *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Ed. *I.A. Daglis*. – Kluwer Academic Publishers. – Dordrecht. – 2004.
5. Прямые и косвенные угрозы космической погоды. В книге "Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты". Том "Системные исследования чрезвычайных ситуаций". МГОФ "Знание", 2015, с. 784–794.
6. *Larose D.* Effects of Solar-Geomagnetic Disturbances on Power Systems. The Hydro-Quebec System Blackout of March 13, 1989. IEEE Special Publication 90TH0291-5 PWR. 1989. p. 10–13.

7. Severe Space Weather Events – Understanding Societal and Economic Impacts. A Workshop Report. (Washington DC: The National Academies Press, 2009)
8. В.Д. Кузнецов. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии, 2014, № 3(6), с. 3–13.
9. В.Д. Кузнецов. Солнечные источники космической погоды. Труды Международной конференции "Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле", 4-8 июня 2012 г., Москва, ИКИ РАН, 2013, том 1, с. 11–27, под ред. А.И. Григорьева и Л.М. Зеленого.
10. M.Ya. Marov, V.D. Kuznetsov. Solar Flares and Impact on Earth. In: Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. – eds. J. Pelton and F. Allahdadi. – 2014.
11. Кузнецова Т.В., Лаптухов А.А., Кузнецов В.Д. Учет геометрии взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли в геоэффективных параметрах и прогнозе геомагнитной активности // Астрономический Вестник, том 40, № 6, 561–568, 2006.
12. S. Odenwald, J. Green, W. Taylor. Forecasting the impact of an 1859-calibre superstorm on satellite resources // Advances in Space Research, v. 38, 280–297, 2006.
13. Boteler D.H. Geomagnetic effects on the pipe to soil potential of a continental pipeline // Adv. Space Res. 2000. v. 26. № 1. p. 15–20.
14. Executive Order – Coordinating Efforts to Prepare the Nation for Space Weather Events. The White House, Office of the Press Secretary, October 13, 2016.
15. National Space Weather Strategy. October 2015.  
[https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final\\_nationalspaceweatherstrategy\\_20151028.pdf](https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalspaceweatherstrategy_20151028.pdf)
16. National Space Weather Action Plan. October 2015.  
[https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final\\_nationalspaceweatheractionplan\\_20151028.pdf](https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalspaceweatheractionplan_20151028.pdf)
17. C.J. Schrijver, K. Kauristie, A.D. Aylward, et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS // Advances in Space Research, 2015, 55, 2745–2807.  
COSPAR/ILWS Roadmap "Understanding space weather to shield society"  
<http://www.lmsal.com/~schryver/COSPARrm>
18. В.Д. Кузнецов, Н.А. Махутов. Физика солнечно-земного взаимодействия и проблемы безопасности энергетической инфраструктуры страны // Вестник РАН, 2012. Т. 82. № 2. С. 110–118.
19. В.Д. Кузнецов, Н.А. Махутов. Необходимость защиты объектов энергоинфраструктуры от магнитных бурь // Аэрокосмический курьер, № 1(73), 66–67, 2011.
20. В.Д. Кузнецов. Солнечно-земная физика и ее приложения // УФН, 2012, т. 182, № 3, 327–336.

## **Chapter 28**

### **SOLAR ACTIVITY AND TECHNOSPHERE**

© V.D. Kuznetsov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
Moscow, Troitsk, Russia*

A review of solar activity factors impacting on the near-Earth space and technosphere are given. Solar activity in the form of enhanced fluxes of hard electromagnetic and corpuscular radiation, solar wind streams and mass ejec-

tions is considered as a principal source of space weather creating the dangerous for the astronauts, satellites, International Space Station and for the ground technical systems. The examples of effects of solar activity on the space and ground technosphere are given.

# **Заключение**



## Дискуссия

Темы, затронутые в книге, изначально были подобраны, как дискуссионные, и не могли не вызвать бурного обсуждения на коллоквиуме. Так, активно дискутировался вопрос о времени существования и способах образования океанов Земли. В.А. Дорофеева высказала свое несогласие с точкой зрения, прозвучавшей в докладе А.Ю. Розанова, что земной океан возник только через 500–600 млн. лет после образования Земли в результате поздней метеоритной бомбардировки, и что вся вода на Землю была принесена из космоса. Она предложила искать внутренние, эндогенные источники земной воды. Её точка зрения была поддержана О.И. Кораблевым, который также считает, что на ранней Земле и Марсе в течение первых 0,5 млрд лет их существования присутствовали поверхностные океаны, по толщине сопоставимые с современными. Чернов Г.П. высказал мнение, что в момент образования планет Солнечной системы жизнь не могла там зародиться из-за слишком тесного соседства с плотной звездной ассоциацией совместно возникающих звездных систем – «сестёр» Солнца, а также из-за частых вспышек сверхновых. По его мнению (и мнению С. Лема), жизнь могла зародиться в следующем миллиардолетии, т.е. не ранее, чем через 500 млн лет после образования Солнца, когда Солнечная система вышла из спирального рукава в межспиральное (более широкое) пространство, и удалилась от губительных катаклизмов. Баренбаум А.А. считает, что модели происхождения Солнечной системы надо рассчитывать, учитывая струйное истечение вещества из центра спиральных галактик. С.П. Перов присоединился к мнению А. Твердислова, что для построения моделей жизни недостаточно учитывать только биологические или химические закономерности, поскольку они являются лишь инструментами для реализации основных физических принципов организации материи. Также С.П. Перов привел цитату С. Хокинга, в которой делается оценка возможного времени возникновения жизни во Вселенной, исходя из роли воды в формировании жизни. С. Хокинг: «Я уже упомянул, что Вселенная охладилась с 4000 К до 60 К. Но после примерно 10 млн лет с момента Большого взрыва температура Вселенной ещё составляла порядка 100 С, то есть температуру кипения воды. А ещё через 7 млн лет она охладилась до 0 С, температуры замерзания воды. Что привело астрономов к мысли, что примерно 7 миллионов лет повсюду во Вселенной можно было найти жидкую воду. А на Земле, где бы мы ни нашли жидкую воду, там же встречается и жизнь. Возможно, что примитивная жизнь могла сформироваться, когда Вселенной было всего 10 млн лет. Физик Ави Лёб [Avi Loeb] называет это время эпохой обитаемой Вселенной. Никаких доказательств этой возможности нет, но идея очень крутая».

## **ДРЕВНЯЯ ЗЕМЛЯ: ОБ ОКЕАНЕ, КЛИМАТЕ И ЖИЗНИ** (замечания к дискуссии)

© М.Я. Маров

Я решил выступить в заключительной дискуссии, прежде всего потому, что, как я надеюсь, выражу общее мнение участников нашего коллоквиума, сказав, что он оказался чрезвычайно удачным и представительным мероприятием, позволившим провести много заинтересованных и полезных обсуждений. Темы, которые обсуждались, были чрезвычайно обширны, о содержании и проблематике можно говорить бесконечно. Я, пожалуй, только кратко коснусь трех вопросов.

Первое, о чем я хочу сказать, касается проблемы миграции малых тел в Солнечной системе. Вот В.А. Дорощева в своем докладе сказала, что она противник гипотезы получения Землей воды и других летучих за счет экзогенного источника. Ну, возможно вы знаете, что у меня есть целый ряд работ по проблемам миграции малых тел и пыли, выполненных совместно с моим сотрудником Сергеем Ивановичем Ипатовым, в которых детальными расчетами обосновывается справедливость такого механизма. Данная гипотеза подтверждается и работами целого ряда авторитетных зарубежных исследователей. Так что у меня, что называется, «рыльце в пушку». Но, объективно обсуждая эту проблему, я должен быть абсолютно честным. Да, действительно, есть целый ряд весомых аргументов, что кометы и астероиды типа углистых хондритов с достаточно большим содержанием воды могли внести очень большой вклад в доставку летучих на Землю и другие планеты земной группы с предполагаемым древним водным океаном. Но не надо понимать меня так, что я полностью исключаю вклад эндогенного источника в формирование водной и воздушной оболочек Земли, и ряд появившихся за последнее время работ довольно убедительно это обосновывают. Хотя, вообще-то говоря, первые доводы я услышал еще где-то в конце 1960-х – начале 1970-х годов от Александра Павловича Виноградова, с которым я в то время довольно тесно общался. Как раз тогда появились первые идеи относительно экзогенного источника воды на Земле, и когда я ему что-то об этом рассказывал, он вдруг мне говорит: «А Вы знаете, Михаил Яковлевич, в мантии Земли может быть несколько земных океанов». Меня это повергло тогда в некое смятение. Но обоснование этому утверждению я нашел в его книге «Геохимия океанов», которую он мне тогда подарил. Это, кстати, были мои первые уроки в геохимии.

А сейчас появились новые свидетельства, среди которых я хочу выделить работы моего коллеги в ГЕОХИ академика Александра Владимировича Соболева по земной мантии. Он сейчас работает не только в ГЕОХИ,

но еще возглавляет лабораторию в Гренобле с великолепным оборудованием, и это дает возможность измерять с исключительно высокой точностью состав вещества минералов; результаты публикуются в самых высококорейтинговых журналах, включая Nature. Одна из последних статей была опубликована в прошлом году в мартовском номере Nature. Она посвящена исследованию оливинов в так называемых каматиитах, точнее коматиит-базальтовых ассоциациях – минералах основных и ультраосновных земных пород. Геохимические характеристики этих магматических пород, происхождение которых связывают с верхней мантией, позволяют реконструировать тепловую эволюцию Земли, восходящую к архею. Это позволяют сделать такие минералы, как оливин и рингвудит, рождающиеся на границе верхней и нижней мантии и присутствующие в изверженных лавовых потоках в ряде областей на земной поверхности. Современные методы, которые используются для их анализа, настолько чувствительны, что позволяют говорить о том, при каких температурах рождались эти минералы, а сами температуры зависят от парциального содержания воды на уровне буквально десятых долей процента. Так вот, было обнаружено (и это опубликовано в мартовском номере Nature), что исследованные образцы оливинов образовались при температуре где-то, по-моему, 1630 градусов, что отвечает условию, когда содержание воды на границе верхней и нижней мантии около 0.5%. А теперь возьмите эти 0.5% и проинтегрируйте их на всю мантию – и вы действительно получите большой объем содержащейся в ней воды. Подтверждением этому выводу служит еще одна работа, свидетельствующая о том, что рингвудит образуется на этих глубинах при примерно таком же содержании воды.

Но с моей точки зрения, вполне определенную роль в создании земной гидросферы сыграли оба – и эндогенный, и экзогенный источники. Это, кстати, позволяет снять ограничение, накладываемое на кометную воду более высоким содержанием в ней отношения дейтерия к водороду, чем в океанической воде на Земле (стандарта SMOW). Если принять, что объем океанов формировался при участии мантийной воды, то примесь кометной воды существенно ослабляет данное расхождение, хотя следует иметь в виду, что само оно не является безусловным. Хочу еще заметить, что миграционный механизм с большой вероятностью сыграл важную роль в происхождении жизни на Земле и, возможно, на других небесных телах во Вселенной.

Второе замечание, которое я хотел бы сделать, касается изменения климата, что также напрямую связано с проблемой происхождения жизни, а в нашем случае – сохранением ее на собственной планете. По этой проблеме были исключительно интересные дискуссии. Опять-таки, должен признаться, что до недавнего времени, где-то еще, может быть, лет 7–8 назад, я не очень разделял точку зрения, что антропогенная нагрузка приводит к столь мощному тренду неблагоприятного изменения климата.

Спорил поэтому с очень хорошо известным защитником данной гипотезы академиком Георгием Сергеевичем Голицыным. Однако в последние годы он меня сильно переубедил, а сам я, действительно, подробнее проанализировал существующую ситуацию. До недавнего времени мне казалось, что наблюдаемый процесс – это отражение своего рода периодики, подобной той, которая исторически происходила на Земле в виде известных временных циклов изменения средней температуры различной длительности. Достаточно вспомнить, что кроме великих оледенений были и непродолжительные, своего рода модуляции, накладывающиеся на общую тенденцию сохранения средних климатических условий. К этому меня склонял и мой опыт изучения и моделирования вариаций содержания озона в средней атмосфере Земли, чем я активно занимался в конце прошлого столетия в связи с нашумевшей проблемой озонной дыры, которую также связывали с антропогенным фактором, а на самом деле все это оказалось фальсификацией. Но если подробно проанализировать нынешнюю ситуацию, то оказывается, что никогда в истории Земли не было столь большой производной роста температуры. И это – мощнейший фактор, который убеждает в том, что человечество действительно серьезным образом повлияло на среду обитания, и это отличается от того, что было с озоном. На самом деле, в отличие от озона, здесь мы имеем совершенно четко выраженный тренд.

Ну и, пожалуй, последнее замечание, уже целиком связанное с ключевой проблемой происхождения жизни. Здесь в одном из докладов прозвучало, что в принципе на Марс могла быть привнесена земная жизнь. Да, я с этим утверждением солидарен. Более того, как-то на одном из совещаний испытал на себе довольно суровую критику начальства, когда сказал, что не вижу большого смысла в стерилизации посылаемых на Марс космических аппаратов. На меня посмотрели с удивлением, то есть как это так? Но давайте трезво оценим ситуацию. Вспомним, что 5 или 6 аппаратов разбились при посадке на марсианскую поверхность, а посадочные аппараты, достигшие цели, могли со временем частично разрушиться. Так что Марс, простите, с большой вероятностью невинность потерял. К тому же стерилизация, которая использовалась, скорее, носила камуфляжный характер – она была, в основном, поверхностная. А вот внутренние агрегаты, приборы и материалы практически не обрабатывались, особенно электроника, которую вряд ли возможно стерилизовать, не опасаясь ее выхода из строя. А ведь когда аппарат разбивается, все разлетается по поверхности. Давайте к тому же вспомним, насколько динамична атмосфера Марса, а следовательно, крайне эффективны массоперенос, перемешивание. Мы хорошо об этом знаем по периодически происходящим там глобальным пылевым бурям. Поэтому, если даже было несколько ограниченных по площади участков посадки, где аппараты разбивались, то совершенно очевидно, что земная жизнь могла быстро распространиться практически на всю террито-

рию. И вопрос теперь в том, смогла ли она приспособиться к марсианским природным условиям или нет.

Сказанное, конечно, не означает, что на Марсе не следует искать наличие признаков жизни – существующей или исчезнувшей в виде бактериальных фоссилов. Первый директор Института космических исследований Георгий Иванович Петров очень хорошо отвечал шуткой на вопрос, есть ли жизнь на Марсе. Он говорил: «На Земле жизни тоже нет». Так вот, вы знаете, я думаю, что на Марсе все-таки жизнь есть. Но с учетом жесткого ультрафиолета, наличия пероксидов на поверхности и, в общем, довольно сильного перепада температур, скорее всего жизнь ушла глубоко под поверхность, где процессы метаболизма, репродукции и другие происходят на основе хемосорбции, а не фотосинтеза. К тому же, давайте не забывать о том, что на Земле существует глубинная биосфера, которая простирается, по крайней мере, на 3 и более километров, а объем биомассы в виде микроорганизмов сопоставим с тем, что мы имеем на земной поверхности. Кстати, среди огромного разнообразия червеобразных, называемых нематодами, которых насчитывается где-то около 100000 видов (включая гельминтов, или попросту глистов) есть, как показали недавние исследования, живущие глубоко под землей. Нематоды были найдены в рудниках Южной Африки на глубине 2 с лишним километра, где в отсутствие света они благоденствуют. В общем, я согласен с утверждением в одном из докладов, что приспособляемость жизни к условиям окружающей среды колоссальна, чему есть многочисленные примеры. И с этой точки зрения мы никоим образом не можем исключать того, что глубинная биосфера существует и на Марсе.

Я заканчиваю. Повторяю, что о проблемах, обсуждавшихся на коллоквиуме, можно было бы сказать очень много. В заключение я просто хочу еще раз поздравить организаторов этого мероприятия с тем, что они его предложили, организовали так, что всех оно воодушевило и пробудило желание не просто поучаствовать, а стимулировало к продолжению своих исследований, возможно, с несколько более широким взглядом на происходящее в окружающей природе и в космосе. Вот это главный итог, и поэтому организаторам еще раз спасибо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*«Но так уж устроен человек,  
что ему необходимо иметь перспективу»*

*И.С. Шкловский, «Вселенная, жизнь, разум»*

Вопрос том, как устроен мир чуть дальше, чем за порогом собственного дома и собственного времени, всегда интересовал пытливым человеческим ум. Космологические картины мира и происхождения жизни рассматриваются и в мифологии всех народов мира, и во всех религиях, и в научных концепциях. Нам хотелось представить в этой книге ту совокупность знаний, которая сложилась в научном сообществе за последние 10–15 лет (в основном, за счет последних экспериментальных данных с космических миссий). Так, благодаря программе «Sun-in-time» ученые получили возможность исследовать большое количество солнцеподобных звезд на разных стадиях их развития, и тем самым лучше понять, каким было в «ранней юности» наше Солнце. Еще 55 лет назад в замечательной книге И.С. Шкловского «Вселенная, жизнь, разум» в ответ на этот вопрос предполагалось, что ультрафиолетовое излучение молодого Солнца было таким же, как в наше время, или даже меньше. Сейчас мы знаем, что это не так. В первый миллиард лет существования Солнца излучение в рентгеновском и УФ-диапазоне на порядки превосходило нынешнюю ситуацию. Более того, солнечная активность была спорадической, а упорядоченные циклы появились около 2,5 млрд лет назад. Существенно меньше был период вращения Солнца и его светимость. И эволюционный отбор первых живых организмов включал в себя не только защитные, но и системообразующие программы использования коротковолнового излучения нашей звезды. Буквально в последние 5 лет изменились оценки возраста магнитного поля Земли. Оно значительно «постарело», все ближе приближаясь по возрасту к моменту формирования самой Земли. Поэтому весьма актуальным вопросом становится приведение в соответствие между собой экспериментальных палеонтологических находок и теоретических моделей геодинамо. А исследования генетиков оптимальной температуры существования самых древних белков (не менее 60 градусов Цельсия на поверхности планеты при современных 15 градусах) заставляют физиков внимательнее присмотреться к «парадоксу слабого молодого Солнца».

Вопрос о происхождении жизни также занимает одно из центральных мест в современных естественнонаучных исследованиях. Большую часть исторического времени человечество придерживалось уверенности о множественности обитаемых миров. Эта идея доминирует в буддистском мировоззрении (вместе с идеей переселения душ в эти самые миры), в раннем христианстве, а в Талмуде так прямо указано количество этих обитаемых

миров – 18 000. Греческая и европейская философия в лице Анаксимандра, Фалеса, Анаксагора, Эпикура, Лукреция Кара, Сирано де Бержерака, Фонтенеля, Гюйгенса, Вольтера, Галилея, Ломоносова, Канта, Лапласа, Гершель поддерживали идею множественности обитаемых миров. Можно сказать, что эта идея получила повсеместное распространение, и ещё во времена Дарвина почти не было ученых или мыслителей, которые выступали бы против нее. Лишь отдельные голоса предостерегали против представления, что жизнь, в том числе разумная, распространена поголовно на всех планетах. Исключений было два: католическая церковь, яростно отстаивающая богоизбранность и единственность земного человечества, и естественно-научная мысль 20 века. В 20 веке доминирующей парадигмой происхождения жизни на Земле становится гипотеза Опарина-Холдейна, которая предполагает возникновение жизни на поверхности Земли в ее первые несколько сотен миллионов лет её существования. В 1600 году Джордано Бруно пошел на костер инквизиции именно за идею о множественности обитаемых миров. Через 350 лет дровишек в его костер накидали бы уже не церковники, а прогрессивные ученые постиндустриального общества.

Но маятник никогда не качается только в одну сторону. В настоящее время наблюдается взаимообогащение и развитие обеих концепций. Место поисков жизни (в её бактериальной форме) значительно расширились. Экспериментальный материал по химическому составу молекулярных облаков в межзвездном пространстве предполагает существование активного добиологического синтеза сложных органических веществ. Это позволяет не рассматривать в качестве конкурентов гипотезу панспермии (занесения изначальных биологических структур из космоса на Землю) и гипотезу зарождения первичной жизни на Земле. Скорее всего, эти гипотезы отражают разные этапы одного и того же процесса. Колыбелью жизни могут быть как молекулярные галактические облака и протопланетные диски, так и вулканы и океаны Земли, Марса и малых планет – спутников планет гигантов, а также экзопланеты. Самые последовательные сторонники панспермии считают, что жизнь как таковая является одним из фундаментальных свойств материи.

Изменилось понятие «зоны обитаемости». Теперь в неё не входит в качестве обязательного условия наличие жидкой воды на поверхности планеты.

В последние 20 лет стало понятно, что эволюционно жизнеспособным является не возникновение отдельных биологических молекул, а возникновение комплексной взаимодополнительной экологической системы на границе трех фаз вещества (жидкой, твердой и газообразной). Современные теоретические модели древней земной биосферы учитывают системообразующую роль интенсивного ультрафиолетового и рентгеновского излучения древнего Солнца. Сохранность древних адаптивных функций био-

систем до наших дней можно объяснить необходимостью самозащиты биосферы во время длительных максимумов или минимумов солнечной активности, в моменты экскурсов и инверсий магнитного поля Земли, а также во время прохождения Солнечной системой плотных рукавов Галактики.

Земная форма жизни не является единственной биохимически возможной. В качестве растворителя вместо воды альтернативные биологические структуры могли бы использовать аммиак, серную кислоту, формамид или жидкую угольную кислоту. В связи с этим встает вопрос: сможет ли человечество идентифицировать такую жизнь как жизнь, если случайно найдет её в своих космических миссиях?

Мы надеемся, что эта книга, явившаяся результатом длительных горячих дискуссий, затягивавшихся порой до поздней ночи, окажется полезной представителям многих специальностей. Мы признательны всем авторам, которые затем с большой тщательностью готовили свои главы этой монографии, многократно переписывая их, учитывая как результаты дискуссий, так и многочисленные замечания редакторов и рецензентов.

*В.Н. Обридко  
М.В. Рагульская*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Астафьева Марина Михайловна,**

*кандидат биологических наук, старший научный сотрудник* лаборатории древнейших организмов и Межинститутской лаборатории бактериальной палеонтологии земных и внеземных объектов Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН, Москва  
astafieva@paleo.ru

**Аюков Сергей Витальевич,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник* Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Краснопресненская лаборатория ГАИШ, Москва  
s.ayukov@gmail.com

**Батурин Владимир Анатольевич,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник* Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Краснопресненская лаборатория ГАИШ, Москва  
vab@sai.msu.ru

**Багров Александр Викторович,**

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник* Института астрономии РАН, Москва  
abagrov@inasan.ru

**Бочкарев Николай Геннадьевич,**

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник* Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва  
boch@sai.msu.ru

**Бусарев Владимир Васильевич,**

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник* Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Отдел исследования Луны и планет, Москва  
busvv@yandex.ru

**Вибе Дмитрий Зигфридович,**

*доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН, старший научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*  
dwiebe@mail.ru

**Воробьева Елена Алексеевна,**

*кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры биологии почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник Института космических исследований РАН, Москва*  
esautin@yandex.ru

**Горшков Алексей Борисович,**

*кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Краснопресненская лаборатория ГАИШ*  
gorshkov@sai.msu.ru

**Демидов Никита Эдуардович,**

*кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института физической химии РАН, Пушкино, Московская область*  
nikdemidov@mail.ru

**Капралов Михаил Игоревич,**

*младший научный сотрудник лаборатории Радиобиологии (сектор астробиологии) Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московская область*  
mast34@mail.ru

**Кацова Мария Михайловна,**

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела звездной астрофизики Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*  
maria@sai.msu.ru

**Ковадло Павел Гаврилович,**

*доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, профессор Иркутского государственного университета, Иркутск*  
kovadlo2006@rambler.ru

**Кузнецов Владимир Дмитриевич,**

*доктор физико-математических наук, директор Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*  
kvd@izmiran.ru

**Лившиц Михаил Аркадьевич,**

*доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*  
maliv@mail.ru

**Маров Михаил Яковлевич,**

*академик РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отделом планетных исследований и космохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*  
marov@geokhi.ru

**Наговицын Юрий Анатольевич,**

*доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом физики Солнца Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Санкт-Петербург*  
nag-yury@yandex.ru

**Обридко Владимир Нухимович,**

*доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела физики Солнца и солнечно-земных связей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*  
obridko@mail.ru

**Орешина Анна Валерьевна,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Краснопресненская лаборатория ГАИШ, Москва*  
avo@sai.msu.ru

**Павлов Анатолий Константинович,**

*доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории масс-спектропии Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*  
anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru

**Печерникова Галина Викторовна,**

*доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института динамики геосфер РАН, Москва*  
galpech@gmail.com, pechernikova@idg.chph.ras.ru

**Рагульская Мария Валерьевна,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела физики Солнца и солнечно-земных связей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, старший научный сотрудник кафедры патофизиологии медицинского факультета Российского университета дружбы народов, Москва*  
ra\_mary@mail.ru

**Розанов Алексей Юрьевич,**

*академик-секретарь Президиума РАН, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией древнейших организмов и Межинститутской лаборатории бактериальной палеонтологии земных и внеземных объектов Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН, профессор кафедры палеонтологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*  
aroza@paleo.ru

**Рускол Евгения Леонидовна,**

*доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва*  
evgeniar177@yandex.ru

**Симаков Михаил Борисович,**

*кандидат химических наук, научный сотрудник Группы экзобиологии Института цитологии РАН, Санкт-Петербург*  
exobio@incras.ru

**Снытников Валерий Николаевич,**

*кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск*  
snyt@catalysis.ru

**Соколов Дмитрий Дмитриевич,**

*доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва*  
sokoloff.dd@gmail.com

**Старченко Сергей Владимирович,**

*доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией главного магнитного поля Земли Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*  
sstarchenko@mail.ru

**Стояновская Ольга Петровна,**

*кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск*  
stop@catalysis.ru

**Твердислов Всеволод Александрович,**

*доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой биофизики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*  
tverdislov@mail.ru

**Храмова Елизавета Гивиевна,**

*научный сотрудник отдела физики Солнца и солнечно-земных связей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*  
sinop@yandex.ru

**Чепурова Валентина Михайловна,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела небесной механики Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*  
chep@sai.msu.ru

**Чепцов Владимир Сергеевич,**

*аспирант кафедры биологии почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, инженер лаборатории масс-спектрометрии и активной диагностики Института космических исследований РАН, Москва*  
cheptcov.vladimir@gmail.com

**Шематович Валерий Иванович,**

*доктор физико-математических наук, заведующий отделом исследований Солнечной системы Института астрономии РАН, Москва*  
shematov@inasan.ru

**Шиховцев Артем Юрьевич,**

*кандидат физико-математических наук, научный сотрудник* Института  
солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

**artempochta2009@rambler.ru**

**Язев Сергей Арктурович,**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*  
Института солнечно-земной физики СО РАН, *директор* астрономической  
обсерватории, *профессор* Иркутского государственного университета, Ир-  
кутск

**SYazev@gmail.com**

**СПИСОК АВТОРОВ**

- Астафьева М.М.* 245  
*Аюков С.В.* 33, 53  
*Багров А.В.* 128  
*Батулин В.А.* 33, 53  
*Ботта Дж.* 149  
*Бочкарев Н.Г.* 21  
*Бусарев В.В.* 157  
*Вибе Д.З.* 139  
*Воробьева Е.А.* 273  
*Горшков А.Б.* 33, 53  
*Демидов Н.Э.* 253  
*Ди Мауро Э.* 149  
*Капралов М.И.* 149  
*Карота Е.* 149  
*Кацова М.М.* 63  
*Ковадло П.Г.* 180  
*Красавин Е.А.* 149  
*Кузнецов В.Д.* 307  
*Лившиц М.А.* 63  
*Маров М.Я.* 320  
*Мишенина Т.В.* 63  
*Наговицын Ю.А.* 297  
*Низамов Б.А.* 63  
*Обридко В.Н.* 9  
*Орешина А.В.* 33, 53  
*Павлов А.К.* 264  
*Печерникова Г.В.* 91, 117  
*Рагульская М.В.* 195  
*Розанов А.Ю.* 149, 223  
*Рускол Е.Л.* 117  
*Саладино Р.* 149  
*Сергеев В.Н.* 91  
*Симаков М.Б.* 283  
*Снытников В.Н.* 43, 213  
*Соколов Д.Д.* 99  
*Старченко С.В.* 105  
*Стояновская О.П.* 43  
*Твердислов В.А.* 231  
*Тимошенко Г.Н.* 149  
*Храмова Е.Г.* 74  
*Чепурова В.М.* 187  
*Чепцов В.С.* 273  
*Шематович В.И.* 167  
*Шиховцев А.Ю.* 180  
*Язев С.А.* 180

*Научное издание*

# Жизнь и Вселенная

Коллективная монография  
под редакцией  
В.Н. Обридко и М.В. Рагульской

Подписано в печать 16.06.2017. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ .  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1; ,75. Тираж 500 экз. Заказ № 56; .

---

Отпечатано в Издательстве ВВМ .  
198095, Санкт-Петербург, ул. Швецова, 41.