

## ГАЛАКТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, МОЛОДОЕ СОЛНЦЕ, ЗЕМЛЯ И БИОФИЗИКА ЖИВЫХ СИСТЕМ

© 2020 г. М.В. Рагульская, В.Н. Обридко, Е.Г. Храмова

*Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4*

*E-mail: ra\_mary@mail.ru, obridko@izmiran.ru, sinop@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.

После доработки 30.01.2020 г.

Принята к публикации 03.03.2020 г.

Фактор воздействия излучения молодого Солнца и галактических космических лучей на физические условия на ранней Земле является существенно недооцененным при изучении проблемы возникновения и эволюции биосферы. В статье рассматривается динамика солнечных и галактических факторов за 4.56 млрд лет существования Солнечной системы, оказавшая существенное влияние на формирование адаптационных технологий древних и современных живых систем. Рассмотрены особенности развития биосферы ранней Земли в условиях более тусклого, но более вспышечно-активного молодого Солнца. Обсуждается спектр излучения молодого Солнца и парадокс несоответствия спектра поглощения хлорофилла спектру солнечного излучения, а также пути решения этого парадокса. Подчеркивается роль учета радиационного излучения при рассмотрении моделей ранней биосферы Земли и гипотетических биосфер спутников планет-гигантов и экзопланет.

*Ключевые слова: космические лучи, излучение слабого молодого Солнца, первичная биосфера, происхождение жизни, фотосинтез, биофизика сложных систем.*

DOI: 10.31857/S0006302920040249

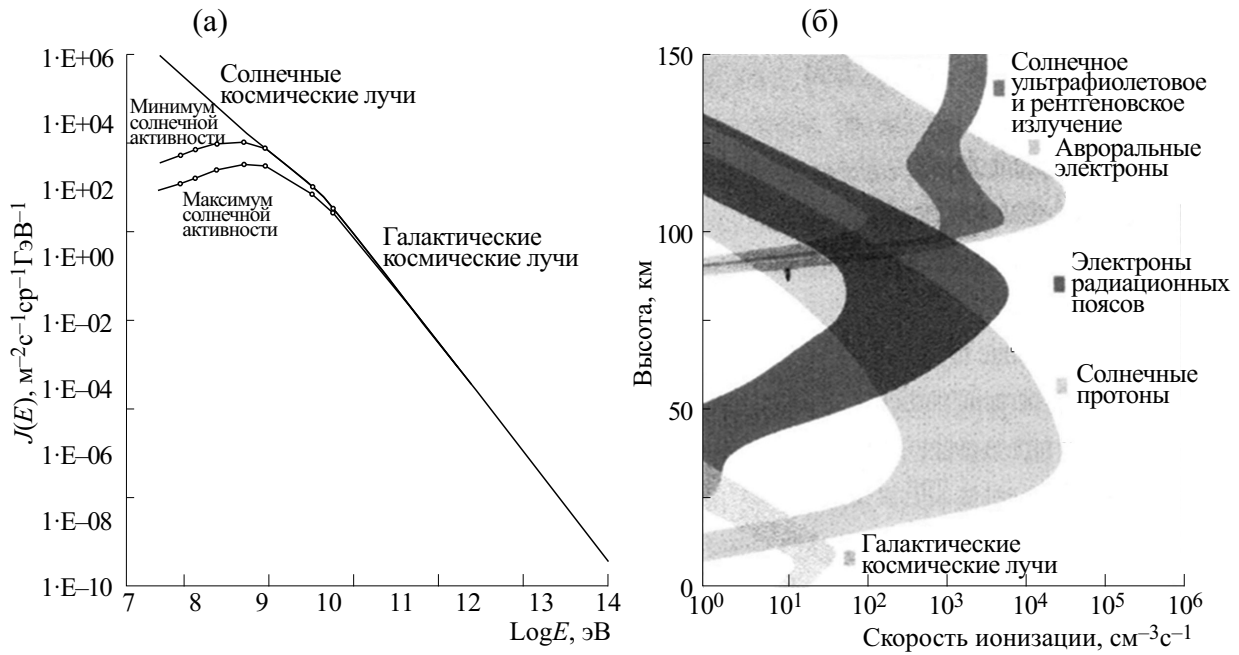
Существование первых земных живых систем датируется 3.8–4.0 млрд лет назад (возраст Солнца и Солнечной системы составляет 4.56 млрд лет). В первые 2 млрд лет условия в Солнечной системе и на самой Земле существенно отличались от современных. Другим было все: период вращения звезды, ее масса, активность и динамика Солнца, конфигурация магнитных полей Солнца и форма гелиосферы, расстояние от Земли до Солнца и Луны, период вращения Земли, химический состав атмосферы и температура поверхности нашей планеты, ее магнитное поле и состав океанов. Первичная биосфера выживала не в райском дарвиновском пруду, а скорее в адских испарениях перегретых соединений серы. Более подробно вопрос физических условий в ранней Солнечной системе и на Земле рассмотрен в работах [1, 2]. Современные модели происхождения жизни обсуждаются в работах [3–6].

Однако есть факторы, сопровождавшие биосферу на протяжении всей ее истории. А именно – излучение Солнца во всех диапазонах и космические лучи, а также галактические факторы. Остро вопрос

об уровне радиационного излучения стоит и при рассмотрении условий существования жизни на экзопланетах. Одним из самых существенных факторов, определяющих возможность развития жизни на Земле, планетах земной группы, спутниках планет-гигантов или экзопланет, является светимость материнской звезды и интенсивность радиационного излучения на поверхности планеты. Для Земли она определяется динамикой и магнитными полями Солнца, солнечными и галактическими космическими лучами. Для спутников газовых планет-гигантов к этим факторам присоединяется еще излучение ускоренных частиц основной планеты. Интенсивность солнечных и галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ соответственно) находится в противофазе, поэтому активность Солнца является определяющим фактором радиационной безопасности как древней, так и современной биосферы.

Солнце является основным источником энергии для биосферы. Лишь небольшая часть энергии поступает из недр Земли. Современная биосфера является активным геологическим фактором. Перерабатываемая живыми организмами энергия Солнца почти в 30 раз превышает энергию тектонических и вулканических процессов и практически равна всей тепловой энергии, посту-

*Сокращения:* СКЛ – солнечные космические лучи, ГКЛ – галактические космические лучи, ЭКГ – электрокардиограмма.



**Рис. 1.** Галактические и солнечные космические лучи, их энергия и высота проникновения. (а) – Энергетический спектр космических лучей по данным работы [7]. Приведен (в логарифмической шкале) совместный энергетический спектр протонов солнечных и галактических космических лучей в околоземном пространстве в минимуме и максимуме солнечной активности. Максимумы интенсивностей СКЛ и ГКЛ находятся в противофазе. Также рисунок наглядно демонстрирует, что интенсивность галактических космических лучей превышает интенсивность солнечных на много порядков. (б) – Распределение частиц в приповерхностных слоях Земли от 0 до 150 км после взаимодействия с магнитосферой и атмосферой нашей планеты. Приведен состав, высота проникновения и скорость ионизации космических лучей в атмосфере Земли по данным работы [8].

пающей из недр Земли. В отделе солнечно-земных связей ИЗМИРАН с 1998 г. идет ежедневный мониторинг биомедицинских параметров постоянной группы обследуемых, параметров обычной и космической погоды. С 2003 г. проводится разноширотный геомедицинский онлайн-мониторинг «Гелиомед». Описание методик и результатов проекта «Гелиомед» приведено в монографиях [1, 2, 29]. Также авторы статьи десять лет принимают участие в российской Программе Президиума РАН по происхождению жизни и астробиологии. Комплексный анализ результатов одновременных онлайн-мониторингов в различных городах от Якутска, Москвы, Саратова до Симферополя, Софии и Баку (в рамках российско-украинского проекта «Гелиомед» 2003–2018 гг.), а также анализ результатов мониторинга эталонных клеточных культур 2000–2012 гг. (Е.Н. Громозова, Киев, Украина) и динамики параметров космической погоды позволяет сделать вывод, что фиксируемые в настоящее время адаптационные реакции различных биосистем (от человеческого сообщества до колоний клеток) на изменения солнечной активности были заложены на самом раннем этапе формирования биосферы. Более того, формирование и развитие живых организмов происходило под активным влия-

нием супервспышечного излучения тусклого молодого Солнца и галактических космических лучей. Их проявление фиксируется даже в таких основополагающих для биосферы процессах, как фотосинтез (но практически не обсуждается в биологическом сообществе).

Все вышесказанное заставляет более внимательно рассмотреть роль молодого Солнца и космических лучей в становлении и развитии биосферы.

### ГАЛАКТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И БИОСФЕРА

Мощным мутационным фактором, а также фактором, существенно модулирующим динамику биосферы, являются космические лучи. Их два вида: солнечные и галактические, соответственно и два источника: Солнце или галактическая среда. Первые имеют направление от Солнца в окружающее пространство и максимум интенсивности, соответствующий максимуму солнечной активности. Вторые направлены из галактического пространства внутрь Солнечной системы и имеют максимум интенсивности в минимуме солнечной активности. На рис. 1а приведен совместный энергетический спектр протонов солнечных и га-

лактических космических лучей в околоземном пространстве в логарифмической шкале [7]. Видно, что галактические космические лучи обладают на много порядков большей интенсивностью, и только магнитное поле Солнца, создающее гелиосферу, позволяет защищать поверхность внутренних планет Солнечной системы от их губительного излучения. В качестве второго защитного рубежа биосферы Земли выступают магнитное поле и атмосфера нашей планеты. Распределение частиц в атмосфере Земли приведено на рис. 16 [8].

Галактические космические лучи задействованы в живых процессах на всех стадиях и масштабах существования Галактики: от производства органических соединений в галактических облаках [9–11] и до процессов деления клеток в современных биологических структурах. Интенсивность доходящих до Земли галактических космических лучей зависит от вариаций параметров межзвездной среды за пределами Солнечной системы, от распределения магнитных полей на Солнце, формы гелиосферы, формы магнитосферы и состава атмосферы, которые существенно менялись в истории Солнца и Земли [12]. Увеличение интенсивности солнечных вспышек, величины магнитных полей раннего Солнца и более высокая скорость вращения Солнца могло приводить к понижению уровня ГКЛ в Солнечной системе, на планетах земного типа и у поверхности Земли.

Однако существуют и обратные процессы, увеличивающие интенсивность ГКЛ. Это сжатие гелиосферы во время прохождения Солнечной системой рукавов Галактики [13] или в процессе эволюционных изменений конфигурации магнитных полей Солнца [14]. В настоящий момент приблизительный средний размер гелиосферы определяется значениями около 100 а.е. (1 а.е. — расстояние от Земли до Солнца). В процессе эволюции Солнца это расстояние могло изменяться от нескольких астрономических единиц до нескольких сотен астрономических единиц, влияя на интенсивность ГКЛ в Солнечной системе [2].

В качестве еще одного механизма изменения интенсивности ГКЛ при любой солнечной активности можно рассматривать вариации параметров межзвездной среды. В настоящее время Солнце находится в каверне Местной галактической сверхоболочки в теплом разреженном звездном газе, но недалеко от границы с горячим газом. Межзвездный газ в ближайшей окрестности гелиосферы имеет температуру около 8000 К, плотность — несколько десятых долей частицы в кубическом сантиметре, степень ионизации примерно 50%. Горячий газ звездных ветров и взрывов сверхновых звезд обтекает и колеблет галактическую оболочку вокруг Солнца, однако не

успевает ее разрушить. По данным о распределении межзвездных облаков по размерам и плотности выяснилось возможное перемещение Солнца по межзвездным облакам с высокой плотностью больше 100 частиц на кубический сантиметр примерно 130 раз за 4.5 млрд лет [2]. Примерно 16 раз за время своего существования наша звезда перемещалась по облакам с очень высокой плотностью — больше 1000 частиц на кубический сантиметр. В таких условиях резко возрастает образование аномальной субрелятивистской компоненты галактических космических лучей на двуслойной границе гелиосферы, а также возможность интенсивной бомбардировки внутренних планет космическими телами из облака Оорта. Каждая из этих ситуаций может ставить биосферу на грань существования. Сопоставление положения Солнца относительно рукавов Галактики с событиями на Земле приведено в работе [15].

На границе гелиосферы гасится до 90% интенсивности космических лучей, идущих извне. Однако и оставшегося количества сверхэнергичных ГКЛ хватает для весьма существенных изменений параметров межпланетного пространства в Солнечной системе и ситуации на поверхности самой Земли. Более того, интенсивность галактических космических лучей, доходящих до границ гелиосферы, существенно изменяется и в зависимости от места положения Солнца в Галактике. Она может возрастать почти на порядок во время прохождения нашей солнечной системой рукавов Галактики. За время существования биосферы эта ситуация могла возникать от 20 до 80 раз. Десятикратное увеличение плотности межзвездного газа на границе Солнечной системы вызывает сжатие гелиосферы на четверть и соответственно увеличение интенсивности космических лучей на орбите Земли до шести раз. Если учитывать, что в рукавах Галактики плотность межзвездного газа имеет именно такой порядок величины, то периодичность вымираний живых организмов на Земле — ~62 млн лет — вполне может объясняться усиленной бомбардировкой Земли космическими лучами из-за эффекта, описанного выше.

Также существенное влияние на биосферу оказывают такие общегалактические процессы, как вспышки сверхновых звезд. В работе [16] приводится соответствие между крупными вымираниями земной биоты и увеличениями потока излучения из-за вспышек сверхновых в относительной близости от Солнечной системы. Совокупность рассматриваемых солнечных и галактических факторов могла приводить к колебаниям уровня ГКЛ в эволюционно значимое для биосферы время от 25 до 600% от современного значения.

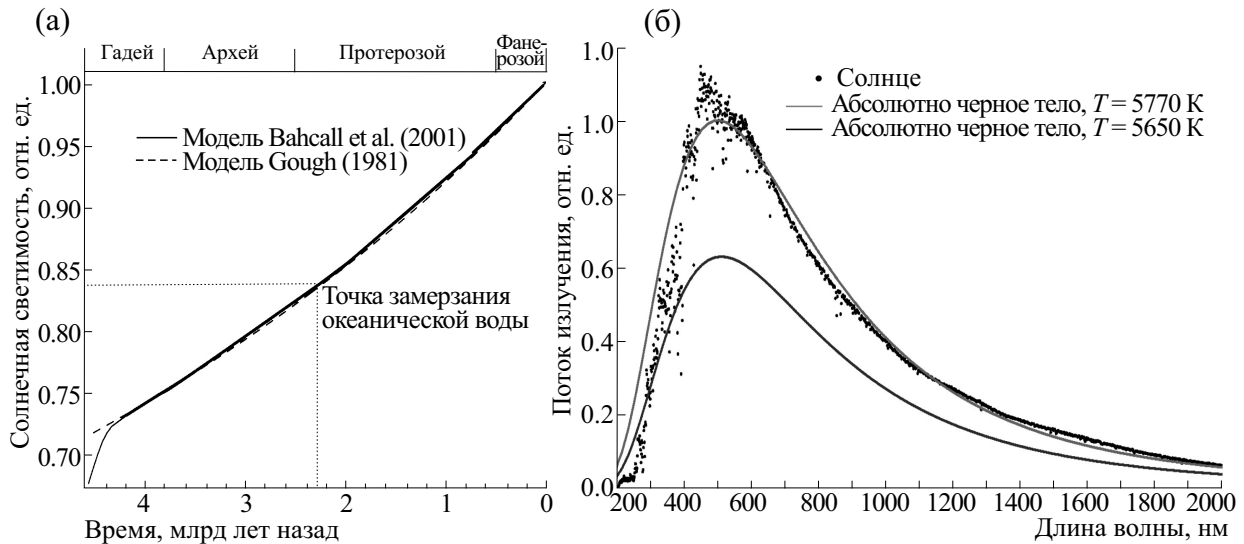
В ранних океанах верхние слои воды под градиентным воздействием космических лучей становились буквально инкубатором биоразнообразия живого мира нашей планеты. Да и сейчас до 15% ионизирующего излучения, воздействующего на биосферу, определяется вторичными космическими лучами. Первичные космические лучи до поверхности не доходят (как и ультрафиолетовое излучение). Сталкиваясь с молекулами атмосферы, они порождают вторичные космические лучи, вызывая так называемые атмосферные ливни. Также вследствие наличия у Земли собственного магнитного поля существует геомагнитный барьер, из-за которого интенсивность космических лучей зависит от широты: в районе полярного овала она максимальная, на полюсах — минимальная. В современных океанах максимум вторичного излучения космических лучей приходится на глубину 2–10 см от поверхности воды, а самые активные мюоны проникают на несколько километров земной поверхности (до 3–4 км в твердых породах, до 9 км — в воде). Более подробно физика космических лучей рассмотрена в работе [17]. Существует и еще один канал влияния космических лучей на оболочки Земли и биосферу. Вследствие понижения (повышения) потока космических лучей (ГКЛ и СКЛ) при их вторжении в атмосферу Земли происходит понижение (повышение) ионизации воздуха, Тем самым космические лучи могут активно воздействовать на состав и динамику атмосферы Земли, и в конечном счете на ее погоду, климат, состояние океанов и биосферы.

По совокупности изученных эффектов космические лучи можно считать одним из основных постоянно действующих биотропных агентов космической погоды. Образование новых химических связей между молекулами и разрывы молекул — важные реакции в полимерах, которые сильнее всего изменяют их физические свойства. Космические лучи оказывают существенное воздействие на эти процессы. В работе [18] впервые на экспериментальном материале показано значение возрастания потоков солнечных космических лучей, сопряженных с возрастанием нейтронной компоненты вторичных космических лучей у поверхности Земли, и вариаций галактических космических лучей для генетического материала клеточных систем. Авторы длительного мониторинга 2000–2012 гг. в работах [19, 20] также связывают изменение окраски дрожжевых культур *Saccharomyces cerevisiae* УКМ-517 и *Rhodococcus erythropolis* УКМ-741 с вариациями ГКЛ.

## РАННЕЕ СОЛНЦЕ, ПАРАДОКС СЛАБОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА И РАЗВИТИЕ БИОСФЕРЫ

Общая картина представлений о строении и эволюции звезд солнечного типа, самого Солнца и первых 0.5–1.0 млрд лет его существования строится на основе наблюдений за солнцеподобными звездами (программа «Солнце во времени»). Раннее Солнце резко отличается от сегодняшнего. Оно было более тусклым, но при этом — значительно более активным. Молодое Солнце имело период вращения 6–8 суток, массу — до 103%, активность — нестабильную и нерегулярную. Интенсивность вспышечных спорадических процессов излучения была в 100–1000 раз выше современной, особенно в гамма-излучении, рентгеновском, ультрафиолетовом и радиоизлучении [2, 21, 22]. Возможно, что установление упорядоченных циклов (существенно более коротких, чем сегодня) произошло не сразу, а около 2.0–2.5 млрд лет назад при периоде вращения 15 суток и солнечной активности в 5–10 раз выше современного максимального уровня [23]. Вспышки на раннем Солнце происходили гораздо чаще, длились дольше современных и достигали энергий на два порядка больших, чем сегодня. Из наблюдений за солнцеподобными звездами можно предположить, что частота вспышек могла быть в 20 раз, а длительность событий — в 500 раз больше современных значений. Это оценка относится и к потоку мощного коротковолнового рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Молодое Солнце обеспечивало на несколько порядков более интенсивный солнечный ветер и поток солнечных космических лучей, усиленно бомбардировавших поверхность Земли и первые биологические системы [1, 2, 24].

Одновременно с высокой солнечной радиационной активностью для молодой биосферы существовала и другая проблема — недостаток солнечного излучения, особенно в видимом диапазоне спектра. К моменту возникновения первичной биосферы Земли (~4 млрд лет назад) светимость Солнца составляла примерно 75% от современной (рис. 2а из работы [24]). Несмотря на существенно более высокую вспышечную активность, молодое Солнце было тусклым, и его энергии было недостаточно для наличия больших объемов жидкой воды на поверхности Земли. Исходя из низкой светимости Солнца, первые 2.8 млрд лет планета должна была бы быть замерзшей. Можно придумать модели ранней биосферы Земли, зародившейся и существовавшей первые 2.0–2.5 млрд лет под ледяной коркой, однако исследования геологов показывают существование открытых океанов, а генетики утверждают, что первые белки функционировали при температурах не менее +60°C [25]. Есть и физический аргумент «про-



**Рис. 2.** (а) – Парадокс слабого молодого Солнца и эволюционное изменение светимости Солнца. Приведена болометрическая светимость Солнца за время его эволюции за последние 4,6 млрд лет по стандартной модели (сплошная линия) и в аппроксимации (пунктирная линия). По оси абсцисс – время, млрд лет, по оси ординат – изменение солнечной светимости относительно современности (современная светимость принята за единицу). Около значения 0,85 (примерно 2,0–2,5 млрд лет назад) отмечена светимость Солнца, определяющая точку замерзания океанической воды при современном химическом составе океанов и атмосферы Земли [1]. Из графика следует, что первые 2,0–2,5 млрд лет Земля должна была бы быть замерзшей, однако геологические и палеонтологические данные показывают, что это не так. Уже 4 млрд лет назад на Земле были океаны жидкой воды. (б) – Спектральный состав излучения Солнца (точки) и абсолютно черного тела при эффективных температурах, соответствующих современному Солнцу. По оси ординат – поток излучения на земной орбите, нормированный таким образом, что максимум потока для абсолютно черного тела равен 1 (согласно работе [2]). Из графика видно, что смещение спектра излучения молодого Солнца было незначительным и не могло покрыть недостаток поступающей на Землю энергии из-за тусклости молодого Солнца.

тив»: если бы Земля действительно изначально представляла собой «снежный ком», альbedo планеты возросло бы примерно до 70% (современное значение альbedo – 30%). При таком высоком альbedo даже полуторакратное последующее увеличение светимости до современного уровня не позволило бы растопить Землю. И наша планета до сих пор оставалась бы в замороженном состоянии.

Между тем существование биосферы и жидкой воды зафиксировано около 3,8 млрд лет назад (оптимистичная оценка – 4 млрд лет назад), одновременно с зафиксированным началом развития жизни на Земле. На самом деле недостаток тепла является еще более существенным, так как по данным биологов и палеонтологов средняя температура на Земле в этот период была около  $+70^{\circ}\text{C}$  (по самым скромным оценкам – не ниже  $+40^{\circ}\text{C}$ ) против современных  $+15^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, наблюдается явный парадокс, так называемый «парадокс слабого молодого Солнца». Он заключается в противоречии между палеоклиматическими данными и астрофизическими моделями эволюции Солнца и требует решения, например, за счет интенсивной потери массы Солнца, другого расстояния между Землей и Солнцем, высокой геотермальной активности на поверхно-

сти нашей планеты или другого состава атмосферы ранней Земли, обеспечивающего сильный парниковый эффект [26]. У всех этих моделей есть свои достоинства и недостатки, но ни одна из них в полной мере не решает парадокс. В то же время каждая из этих моделей предполагает разные условия для существования первичной биосферы. Похоже, что выбор наиболее оптимальной модели ранней Солнечной системы будут осуществлять биологи, а не физики. Подробно пути решения парадокса слабого молодого Солнца были рассмотрены в работах [1, 2, 24, 26, 27]. В этой работе обратим внимание на аспекты, которые могли оказаться существенными для развития биосферы.

При рассмотрении вопроса об условиях существования ранней биосферы Земли существенным может быть не только изменение солнечной светимости, но и изменение спектра солнечного излучения. При прохождении солнечного излучения сквозь современную земную атмосферу на рэлеевское рассеяние приходится примерно 30%. Из них треть излучается в космос, т. е. 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, а также повлиять на выбор предпочтительных длин волн, поглощаемых бактериями.

Из стандартной модели Солнца следует эволюционное возрастание солнечной светимости за счет увеличения эффективной температуры Солнца и солнечного радиуса. Поэтому эффективная температура за 4.6 млрд лет выросла незначительно, от 5650 до 5770 К (рис. 26). Это соответствует спектральному сдвигу примерно в 100 Å, что могло дать лишь небольшую экономию энергии ранней земной атмосферой в пределах 1.5%. Для нагрева поверхности ранней Земли до плюсовой температуры этой величины недостаточно. Однако даже слабый спектральный сдвиг мог повлиять на формирование способов переработки и накопление энергии живыми организмами, например на развитие фотосинтеза.

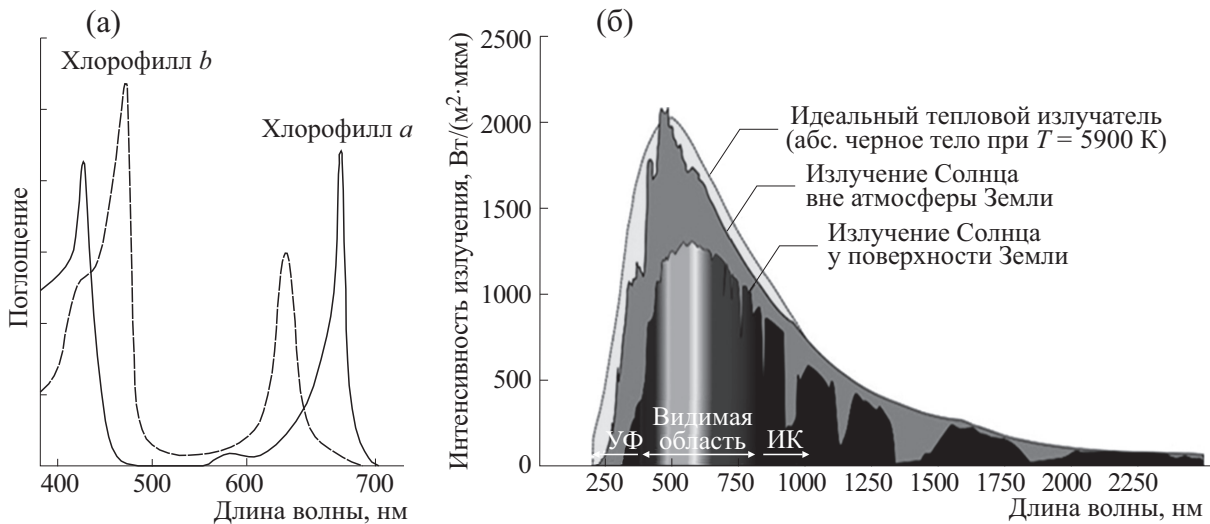
Для смягчения парадокса слабого молодого Солнца одним из авторов данной работы (Е.Г. Храмовой) была предложена гипотеза органических пленок (как предшественника развитой биосферы) на поверхности земного океана [2]. Наличие такой пленки нарушает газообмен между океаном и атмосферой и вносит изменения в теплообмен. Химический состав этой пленки мог быть весьма разнообразным. Пленка, находившаяся на границе раздела фаз, попадала под облучение интенсивным ультрафиолетовым светом молодого Солнца, которое 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. В процессе насыщения кислородом непрозрачность атмосферы для ультрафиолетового облучения увеличивается, и фотолиз органической пленки уменьшается. При этом усиливается ее окисление, а выход продуктов разложения смещается в сторону углекислого газа. Следовательно, эта пленка могла быть постоянным донором парниковых газов.

Таким образом, приповерхностный слой ранних земных океанов с глобальной органической пленкой, который активно бомбардировался ультрафиолетовым светом, рентгеновскими и космическими лучами и обладал необходимым градиентом температуры и питательных веществ, мог стать удачным местом для формирования последующей развитой биосферы. Также в условиях тусклого молодого Солнца глобальная органическая пленка могла внести свой вклад в дополнительный нагрев поверхности Земли.

## РАННЕЕ СОЛНЦЕ, ОРГАНИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ, ФОТОСИНТЕЗ И АДАПТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРВЫХ ЖИВЫХ СИСТЕМ

По-видимому, отбор альтернативных технологий получения, переработки и накопления энергии первыми живыми организмами также существенно зависел от активности молодого Солнца. И не случайно развитие фотосинтеза произошло не сразу, а в тот момент, когда излучение Солнца стало более ярким и стабильным. Более того, при рассмотрении вопроса фотосинтеза возникает еще один парадокс, который имеет фундаментальное значение при рассмотрении эволюции биосферы и тоже может быть связан с глобальной океанской органической пленкой. Он заключается в несоответствии спектра поглощения хлорофилла спектру солнечного излучения. Именно на длинах волн максимальной интенсивности излучения как современного, так и раннего Солнца в спектре поглощения хлорофилла наблюдается провал в области зеленого цвета видимого излучения. Биологи связывают такую ситуацию с необходимостью защиты первых живых организмов от интенсивного излучения молодого Солнца. Однако в этом объяснении не выдерживают критики ни предположение об излишней интенсивности Солнца, ни предположение о защите именно от этой части спектра. Во-первых, как мы уже рассмотрели выше, излучение молодого Солнца было крайне тусклым и являлось ценным энергетическим ресурсом. Первые живые организмы должны были отчаянно конкурировать за него, а не закрываться от ценного и постоянного источника поступления энергии. Во-вторых, во время мощных и длительных вспышек (происходящих на раннем Солнце постоянно) максимальные скачки губительной для живых организмов интенсивности излучения наблюдались в диапазоне синего, ультрафиолетового и рентгеновского излучения (излучение возрастало от 10 до 1000 раз, увеличиваясь в более коротковолновой части спектра). В оптическом же максимуме видимого зеленого света интенсивность излучения изменялась незначительно, не более 5% [21]. Таким образом, сдвиг максимума поглощения хлорофиллов в область максимума нестабильности излучения Солнца явно не способствовал сохранению и защите организмов.

Отметим, что проблема несовпадения спектров лежит не в области биохимического синтеза. Существуют пигменты, которые поглощают в центральной области видимого спектра (например, из групп каротиноидов и фикобилинов). Спектр поглощения воды (фотосинтез зародился у организмов, живущих в воде) тоже не объясняет особенности спектра поглощения хлорофиллов.



**Рис. 3.** Парадокс фотосинтеза. (а) – Спектры поглощения хлорофиллов *a* и *b*. (б) – Сравнительные спектры излучения черного тела и Солнца вне атмосферы Земли и у поверхности Земли. Видно, что именно на длинах волн максимальной интенсивности излучения как современного, так и раннего Солнца в спектре поглощения хлорофилла наблюдается провал в области зеленого цвета видимого излучения. В условиях катастрофической нехватки энергии тусклого молодого Солнца на поверхности ранней Земли, отказ первых фотосинтезирующих организмов максимально использовать поступающее солнечное излучение в самом стабильном и интенсивном участке спектра является парадоксальным.

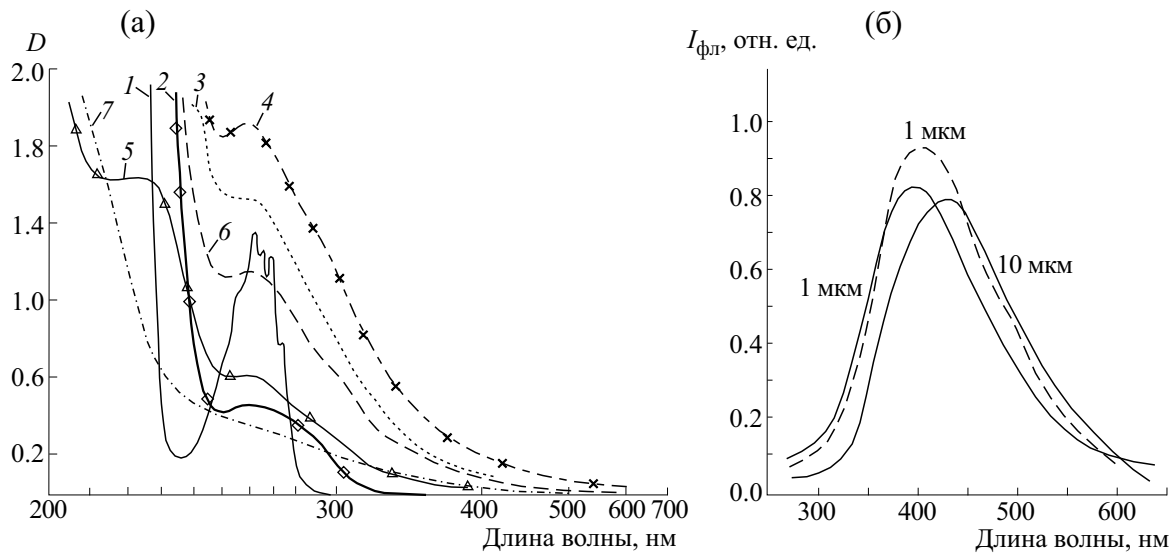
Таким образом, существует выраженный парадокс несоответствия спектров излучения Солнца и поглощения хлорофиллов физическим условиям на ранней Земле в решении задачи максимальной сохранности живых систем. Рассмотрим этот парадокс подробнее.

Фотосинтез – это преобразование энергии света в энергию химических связей органических соединений. Сравним спектр поглощения хлорофиллов *a* и *b* (основных хлорофиллов оксигенного фотосинтеза) со спектром солнечного излучения (рис. 3). В спектре поглощения хлорофиллы *a* и *b* имеют две интенсивные полосы поглощения в красной (640–700 нм) и синей (400–450 нм) областях видимой части спектра. Из рис. 3 очевидно, что максимумы поглощения хлорофиллов не совпадают с областью максимума солнечного спектра у поверхности Земли. Более того, именно в максимуме интенсивности как современного, так и раннего Солнца наблюдается провал. Возникает логичное предположение, что в момент формирования технологии фотосинтеза на поверхности Земли присутствовало что-то, что поглощало самое «вкусную», стабильную и легкодоступную часть солнечного излучения и перекрывало доступ к свету эволюционно новым формам бактерий. И это «что-то» эволюционно существовало еще до развития фотосинтеза, заняв самую выгодную экологическую нишу. В результате первым фотосинтезирующим организмам пришлось довольствоваться только доступным источником света, по краям спектра солнечного излучения.

Что в водной среде молодой Земли в период формирования фотосинтеза могло поглощать солнечное излучение в центральной части видимого спектра, оставляя окна прозрачности в красной и синей части? Самый простой ответ – появившаяся одновременно с возникновением океанов 4 млрд лет назад биогенная или абиогенная пленка, уже упоминавшаяся в качестве одного из возможных путей решения парадокса слабого молодого Солнца. К сожалению, на данный момент состав этой пленки неизвестен. К тому же этот состав скорее всего эволюционно менялся под воздействием окружающих факторов. Но существует хорошо изученный современный аналог той древней пленки – пленка нефтяная.

Спектры поглощения нефтяных пленок приведены на рис. 4а [28]. При уменьшении длины волны в диапазоне 300–600 нм оптическая плотность нефтяных пленок растет вне зависимости от сорта нефти. Для излучения свыше 600 нм нефтяная пленка толщиной в 1 мкм практически прозрачна. Это согласуется с максимумами поглощения хлорофиллов в красной области, но не объясняет максимум поглощения хлорофиллов в синей области спектра.

Для объяснения стоит вспомнить еще одно свойство органических пленок – флуоресценцию. Спектр флуоресценции нефтяной пленки имеет один выраженный максимум, который практически не зависит от длины волны облучающего ее ультрафиолета, а зависит от толщины и типа нефти, ее образующей (рис. 4б). При увели-



**Рис. 4.** Пути решения парадокса фотосинтеза: спектральные характеристики современных аналогов древних океанических пленок (согласно работе [28]). (а) — Зависимости оптической плотности от длины волны для нефтепродуктов: бензин (1), дизельное топливо (2), саратовская (3), грузинская (4), шаимская (5) и ливийская (6) нефти. Для бензина толщина кюветы 100 мкм, для остальных нефтепродуктов — 1 мкм. (б) — Спектры флуоресценции ливийской нефти (сплошные линии, толщина кюветы 1 и 10 мкм) и саратовской нефти (пунктирная линия, толщина кюветы 1 мкм) при длине волны возбуждающего излучения 308 нм. Видно, что для сырой нефти различных видов в состоянии пленки максимум флуоресценции расположен в области 420–490 нм при любой длине волны возбуждения, что практически совпадает с максимумами спектра поглощения хлорофиллов (максимум спектра поглощения хлорофиллов 400–450 нм). Можно предположить существование на ранней Земле океанической поверхностной пленки с функцией защиты от разрушительного воздействия жесткого ультрафиолета и рентгена, а также с функцией источника различной органики для находящихся ниже ее микроорганизмов. При этом аккумулированная пленкой энергия коротковолнового солнечного излучения передавалась через флуоресценцию в окружающую среду, причем на длинах волн, которые смогли использовать фотосинтезирующие организмы.

чении толщины пленки от 1 до 100 мкм максимум спектра сдвигается в сторону больших длин волн на 10–40 нм в зависимости от типа нефти [28].

Для сырой нефти различных видов в состоянии пленки максимум флуоресценции расположен в области 420–490 нм при любой длине волны возбуждения, что практически совпадает с максимумами спектра поглощения хлорофиллов (максимум спектра поглощения хлорофиллов 400–450 нм). Так, максимум флуоресценции пленки ливийской нефти толщиной 10 мкм находится в области примерно 430 нм, что соответствует синему максимуму поглощения хлорофилла *a*. К тому же под действием ультрафиолета в поверхностном слое нефтяных пленок происходят активные одновременные процессы разложения исходного материала и возникновения новой органики, например, ароматических соединений [29]. Они отличаются высокими показателями преломления и поглощения в близкой ультрафиолетовой и видимой областях спектра и могут служить сырьем для дальнейшего производства кетонов, альдегидов и кислот ароматического ряда, а также многих других органических веществ.

В результате существенной функцией древней океанической поверхностной пленки оказывает-

ся защита находящихся ниже ее микроорганизмов от разрушительного воздействия жесткого ультрафиолета и рентгена. Более того, океаническая пленка, активно разрушающаяся под действием ультрафиолетового излучения Солнца, служила ценным источником различных органических веществ. А вариации интенсивности ультрафиолетового излучения молодого Солнца (возрастающие во время вспышек на несколько порядков величины) обеспечивали биоразнообразие формирующихся живых организмов и биосистем. При этом аккумулированная энергия коротковолнового солнечного излучения передавалась через флуоресценцию в окружающую среду, причем на длинах волн, которые смогли использовать фотосинтезирующие организмы [30].

Таким образом, глобальная океаническая органическая пленка вполне могла объяснить особенности спектров поглощения хлорофиллов. Она же могла выступить в качестве защиты ранних микроорганизмов от рентгеновского излучения и жесткого ультрафиолетового излучения активного молодого Солнца и источника необходимых химических веществ. Сопоставление спектров поглощения и флуоресценции разных органических пленок, в том числе нефтяных, со спектрами поглощения хлорофиллов может по-



мочь существенно расширить и уточнить наши представления об эволюции климата и состава атмосферы молодой Земли. А учет наличия органической пленки как климатообразующего фактора может внести существенные коррективы как в решение парадокса слабого молодого Солнца, так и в современные климатические модели [27, 30].

Существуют и другие адаптационные стратегии живых систем, имеющие скорее не биологическую, а физическую природу, и сформировавшиеся в качестве защитной реакции на активное вспышечное излучение молодого Солнца и космические лучи [4]. Например, чрезвычайно велика роль интенсивного ультрафиолетового излучения молодого Солнца в формировании единого генетического кода земной биосферы. 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. Благодаря мощному ультрафиолетовому излучению раннего Солнца в формирующейся биосфере одновременно происходили разные типы отбора: отбор стойких к ультрафиолетовому излучению азотистых оснований; отбор нуклеотидов в комплиментарные пары; отбор более длинных и устойчивых молекул РНК; отбор гомихиральных нуклеотидов (смесь изомеров менее устойчива к ультрафиолетовому излучению, чем изомеры с одинаковой хиральностью). В результате существующие молекулы ДНК являются максимально устойчивыми структурами к ультрафиолетовому излучению, хотя не являются единственно возможными. По-видимому, именно ультрафиолетовое излучение молодого Солнца провело отбор единого кода нашей биосферы.

Еще одной адаптационной стратегией могло являться «сбивание в кучу» и «скручивание». 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. Такая адаптационная стратегия повышала шансы для бактерий из центра образования остаться неповрежденными при проникающем внешнем излучении. Эти кластеры послужили прообразами клеток. До сих пор в нашей крови после интенсивных рентгеновских вспышек на Солнце красные кровяные тельца слипаются в кучу, повышая тем самым свертываемость крови [31]. Кластеризация колоний однотипных клеток и передача «сигнала опасности» также существенно повышала выживаемость. В кластеризованных колониях клеток условия существования во внутренней и наружной частях биообразования были

различными. Различались по кластеру химический состав и условия внешней среды (по крайней мере в интенсивности внешних излучений и доступе к ресурсам).

Еще одна успешная адаптационная «стратегия» древних биологических структур в условиях импульсного агрессивного Солнца, имеющая чисто физическую природу, — это способность создавать конгломераты из различных видов биологических объектов. Жизнеспособность таких образований существенно выше не только за счет эффективного совместного использования питательных ресурсов и температурных градиентов, но и за счет повышения радиационной устойчивости. Как показано в работах [2, 32], сообщества из различных видов бактерий выдерживают в 10–12 раз более интенсивное облучение, чем каждый из видов в отдельности.

Столь оптимистичные результаты по радиационной устойчивости живых организмов существенно расширяют зону поиска возможной внеземной жизни на Марсе, спутниках планет-гигантов внутри Солнечной системы и на экзопланетах [1, 2]. Астробиологи пытаются смоделировать типы биосфер, которые могли бы существовать в условиях пониженной светимости Солнца и повышенной радиации, одновременно решая задачу поиска возможной внеземной жизни и моделирования биосферы ранней Земли. Потенциально обитаемые спутники Юпитера и Сатурна подробнее рассмотрены в работе [33]. Из космических тел Солнечной системы именно атмосфера Титана считается максимально приближенной к атмосфере ранней Земли. В современных земных условиях организмы используют различные окислительно-восстановительные пары, основной из которых является  $O_2 \rightarrow H_2O$  (аэробное дыхание). Но вполне можно подобрать такую пару, на которой может быть основана биосфера Титана. Например,  $NH_4^+ \rightarrow N_2$ ;  $NO_3^- \rightarrow N_2$ ,  $CH_4 \rightarrow CO_2$  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. В качестве возможных основ для внеземных биологических циклов особенно часто рассматривают такие процессы, как метаногенез и метанотрофия. Возможно, метанотрофы были одними из первичных организмов и нашей планеты Земля.

Открытие планеты земной группы (Проксима b), вращающейся вокруг звезды Проксима Центавра, привело к множеству работ, обсуждающих возможные условия на этой планете. Поскольку в Солнечной системе основные факто-

ры, определяющие космическую погоду, — это солнечный ветер и космические лучи, представляется важным понять, каковы параметры звездного ветра, галактических и звездных космических лучей около экзопланет. На основе имеющихся данных в работе [34] были представлены оценки скорости и плотности звездного ветра, возможных потоков и флюенсов космических лучей около Проксимы b. Мощные и частые по сравнению с Солнцем вспышки на Проксиме Центавра могут ускорять частицы до максимальных энергий порядка 3150 ГэВ, поэтому интенсивность звездных космических лучей в астросфере экзопланет может оказаться сравнимой с интенсивностью низкоэнергичных космических лучей в гелиосфере. В таких условиях гипотетическая внеземная биосфера должна состоять из радиационно устойчивых организмов.

Таким образом, вопрос об активности молодого Солнца и интенсивности космических лучей в ранней Солнечной системе оказывается важным не только для моделирования биосферы ранней Земли, но и для рассмотрения астробиологических вопросов [35]. Последние данные космических миссий позволяют расширить поиск жизни на целый новый класс объектов. В него вошли ледяные спутники планет-гигантов и другие планетные тела, получающие мало энергии от материнской звезды из-за далекого от нее расположения, но благодаря приливному или радиационному разогреву имеющие подледные океаны, энергию и химические вещества для создания не совсем привычных вариантов биосферы.

#### СОВРЕМЕННАЯ БИОСФЕРА И ДРЕВНИЕ АДАПТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

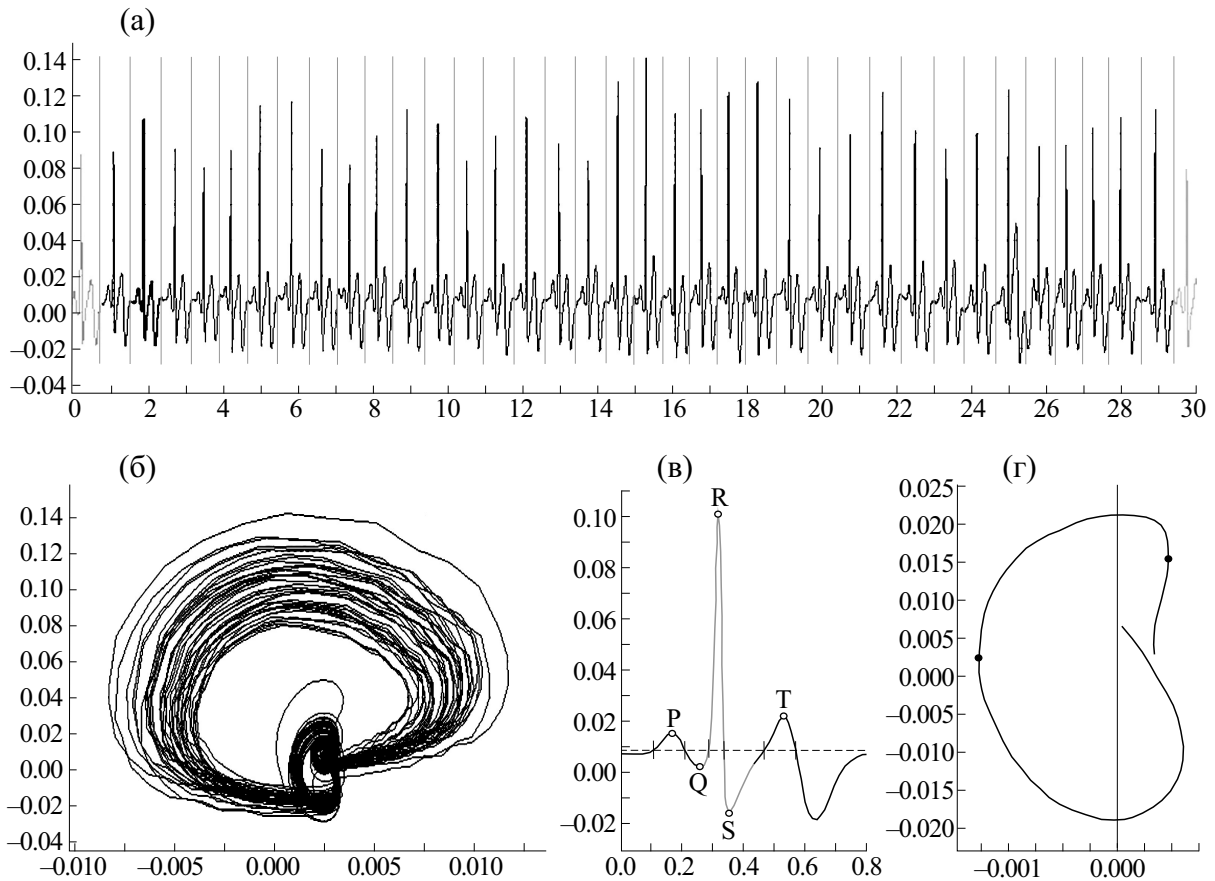
В Солнечной системе в первую сотню миллионов лет ее существования протопланеты находились в условиях жесткой конкуренции. Одни планеты и астероиды попадали в топку молодой звезды, другие выбрасывались за пределы планетной системы, третьи путешествовали по системе, увлекаемые более массивными планетами-гигантами. Внутренние области Солнечной системы были заполнены большим количеством газа, пыли и планетезималей. Молодые сформировавшиеся планеты подвергались активной бомбардировке космическими телами, на поверхности планет активно действовали вулканы [1, 4]. Все эти факторы дополнительно понижало количество и без того тусклого солнечного света, достигающего поверхности планет. Само Солнце приобрело схожие с современными особенности динамики и излучательных процессов только к 2.5–2.0 млрд лет назад. В таких условиях питание от солнечного света было крайне неэффективно и нерегулярно, поэтому первым живым организ-

мам необходимо было осваивать другие источники энергии и способы их накопления.

Одними из первичных длительных хранилищ энергии в биообъектах ранней Земли являются полифосфаты — полимеры ортофосфорной кислоты, остатки которой соединены ангидридными полифосфатными связями. Эти пробиологические структуры до сих пор присутствуют, например, в клетках современных дрожжей (в виде волютиновых гранул) или в тромбоцитах человека и высших животных. Сложные органические вещества могли синтезироваться еще в молекулярных галактических облаках, причем при активном участии галактических космических лучей. Космические лучи могли оказывать существенное влияние и на формирование обменных процессов в первичной биосфере Земли в условиях нехватки излучения молодого Солнца.

Первичная биосфера недоступна для прямого изучения, но имеются аналоги древних биообъектов, содержащие волютиновые гранулы полифосфатов, которые дожили до наших дней. В работах [18–20, 36–41] рассматривался аспект воздействия ГКЛ на современные биосистемы. При длительных мониторингах зафиксированы вариации динамических показателей эталонных клеточных структур с волютиновыми гранулами, статистически значимо совпадающие именно с вариациями ГКЛ (мониторинг 2000–2013 гг., *Saccharomyces cerevisiae* Y-517, Е.Н. Громозова). Эволюционные адаптивные реакции, связанные с ГКЛ и СКЛ, особенно востребованы в минимуме цикла солнечной активности, длительных минимумах (подобных Маундеровскому), и при инверсиях геомагнитного поля. Влияние ГКЛ усиливается при длительных минимумах солнечной активности и инверсиях геомагнитного поля, СКЛ — при циклах солнечной активности высокой интенсивности [39].

Влияние солнечной активности и космогеофизических факторов на биосферу зафиксировано не только на клеточном уровне, но и на популяционном уровне. В 2003–2015 гг. одновременно в различных городах от Баку и Киева до Москвы и Якутска был проведен масштабный онлайн-мониторинг биомедицинских параметров постоянной группы обследуемых и параметров космической погоды. Общая база данных составила более трех миллионов измерений, собранных по единому протоколу и на идентичном оборудовании. В результате многолетнего мониторинга во всех городах были выявлены одновременные статистически значимые изменения биомедицинских параметров обследуемых, связанные с вариациями солнечной динамики, геомагнитного поля и космических лучей. Также рассматривалась связь здоровья обследуемых с вариациями параметров обычной погоды. Подробно технология междуна-



**Рис. 5.** Схема анализа кардиосигнала в фазовом пространстве: (а) — исходная ЭКГ; (б) — циклы ЭКГ и усреднение в фазовом пространстве; (в) — восстановленный эталонный кардиоцикл [1]; (г) — сегмент S–T в фазовом пространстве. Чем более северной является широта этнического происхождения обследуемых, тем короче в их ЭКГ длина S–T-сегмента и больше коэффициент симметрии T-зубца. Поскольку в более высоких широтах амплитуда переменного геомагнитного поля увеличивается, найденные этнические изменения T-зубца скорее всего являются проявлением эволюционных процессов адаптации, обусловленной динамикой Солнца, в масштабе всей популяции.

родного проекта «Гелиомед» и результаты многофакторного комплексного анализа данных изложены в работах [1, 36–40].

Одним из изучаемых параметров мониторинга был кардиосигнал первого отведения электрокардиограммы (ЭКГ) в состоянии покоя и после различных нагрузок, анализируемый в фазовом пространстве. Схема анализа сигнала в фазовом пространстве и построение эталонного кардиоцикла приведена на рис. 5 [38]. Было выявлено, что наиболее выражены внешние нагрузки, связанные с вариациями космической и обычной погоды, проявляются вблизи особых точек около Q-зубца и S–T-сегмента. Также после вспышечных процессов на Солнце даже у здоровых людей наблюдался переход динамики сердца в более хаотический режим функционирования [37]. Статистически значимых изменений R–R-интервалов в зависимости от резких вариаций геомагнитного поля (так называемых «магнитных бурь») у здоровых людей выявлено не было.

Еще одним результатом мониторинга было выявление широтных и этнических особенностей ЭКГ, связанных с вариациями солнечной активности и космогеофизических факторов. Как оказалось, фазовый портрет кардиоцикла является уникальной характеристикой человека, подобной отпечаткам пальцев. При этом у близких родственников одного поколения фазовые портреты в покое различаются незначительно. Аналитическая программа различала их по измерениям, сделанным после интенсивной физической нагрузки. В результате мониторинга различных этнических групп, проведенных на медицинском факультете Российского университета дружбы народов (138 человек), выявлено, что исторически сформировавшиеся этнические группы в фазовом пространстве демонстрируют схожую совокупность признаков ЭКГ [40].

Дополнительный мониторинг пяти семей, насчитывающих в своем составе четыре поколения, выявил передачу характерных признаков фазово-

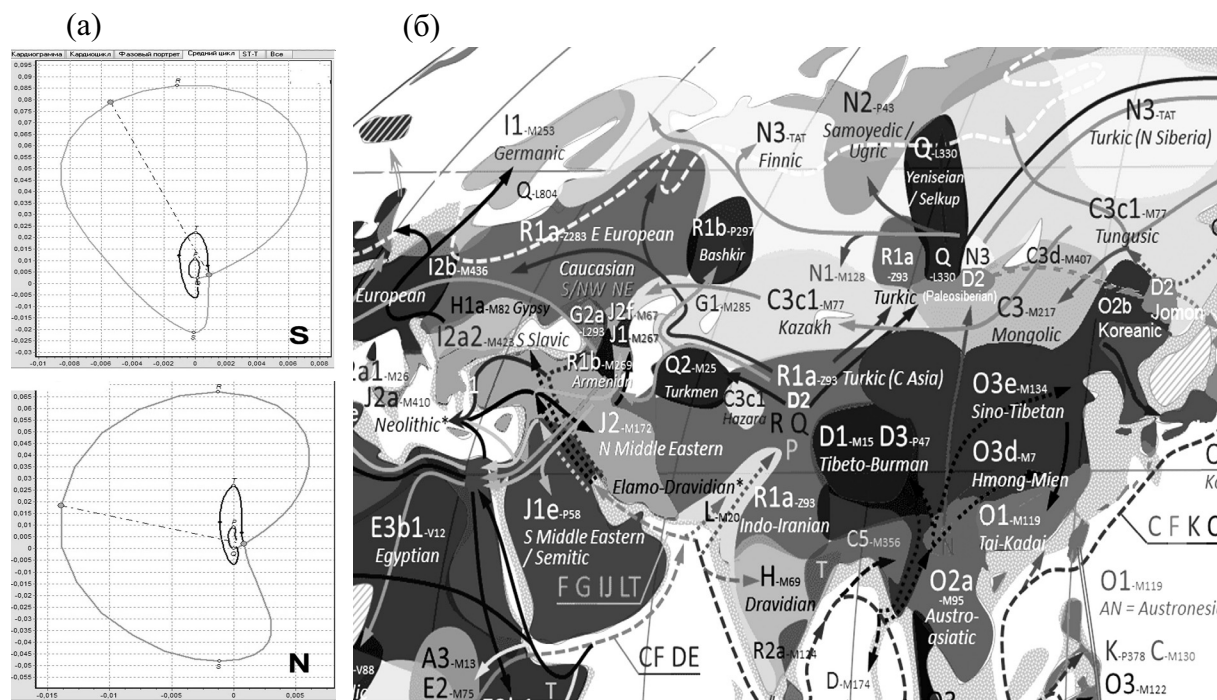


Рис. 6. (а) – Характерные фазовые портреты кардиоцикла «южно-русского» типа (S) и «северо-русского» типа (N); (б) – генетическая карта Евразии. Характерная сердечная динамика передается по наследству и является генетически детерминированной величиной. Она отражает эволюционную адаптацию человечества как биологического вида, а также этнические процессы исторического переселения и смешения народов.

го портрета ЭКГ по наследству, с попеременной сменой половой принадлежности наследника в каждом следующем поколении (мать – сын – внучка – правнук).

Обнаружено разделение ЭКГ по «южно-русскому» и «северо-русскому» типу. Выявленное разделение на «южно-индийский» и «северо-индийский» тип фазового портрета ЭКГ наблюдается у граждан различных районов Индии, приехавших в Москву на обучение. У студентов из других стран также фиксируются этнические отличия фазовых портретов ЭКГ. На рис. 6а приведены характерные фазовые портреты кардиоцикла «южно-русского» (S) и «северо-русского» типа (N). В ходе дальнейших исследований выявлено совпадение «южно-русского» и «северо-индийского» типов фазового портрета.

Для определения возможных причин неожиданных совпадений фазовых портретов кардиоцикла в различных этносах, разделенных многими тысячами километров, было проведено рассмотрение миграционных исторических потоков Евразии. Сравнение результатов мониторинга с генетической картой мира (рис. 6б), а также выборочные генетические анализы показали, что представители обнаруженного нами «южно-русского» и «северо-индийского» типа фазового портрета ЭКГ принадлежат к гаплогруппе R1a, а «северо-русского» – к гаплогруппе N3. Таким об-

разом, показано, что характерная сердечная динамика передается по наследству и является генетически детерминированной величиной. Она отражает эволюционную адаптацию человечества как биологического вида, а также этнические процессы исторического переселения и смешения народов.

Характерные этнические совокупности признаков имеют выраженное широтное различие. Так, чем более северной является широта этнического происхождения обследуемых, тем короче в их ЭКГ длина S–T-сегмента и больше коэффициент симметрии T-зубца. Такая динамика параметров сердечной деятельности характерна для более активного потребления кислорода миокардом. Поскольку в более высоких широтах амплитуда переменного геомагнитного поля увеличивается, найденные этнические изменения T-зубца скорее всего являются проявлением эволюционных процессов адаптации, обусловленной динамикой Солнца, в масштабе всей популяции. Возможно, что существенную роль в зафиксированных реакциях играют волютиновые зерна, присутствующие в тромбоцитах человека [41].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе своего возникновения и развития биосфера постоянно находилась под воздействи-

ем солнечного излучения и космофизических факторов. Эти факторы оказывали существенное влияние на физические условия на ранней Земле, состав атмосферы и химический состав океанов, температуру поверхности. Как показали наблюдения за солнцеподобными звездами, эволюционная адаптация первых живых систем происходила в условиях пониженной светимости и повышенной радиационной опасности молодого Солнца. Вспышечная активность и интенсивность солнечного излучения была на два порядка выше современной, особенно в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне. Формировавшиеся живые системы должны были не только противостоять, но и использовать космогеофизические факторы в своем развитии, например, в отборе единого кода ДНК. В условиях тусклого молодого Солнца одним из факторов, повышающих температуру поверхности планеты до геологически зафиксированных значений, могла стать глобальная океаническая органическая пленка. Наличие такой пленки также объясняет спектр поглощения хлорофилла, который не соответствует максимуму солнечного излучения. Пленка защищала находящиеся ниже ее микроорганизмы от разрушительного воздействия жесткого ультрафиолетового и рентгеновского облучения. При этом аккумулялированная энергия коротковолнового солнечного излучения передавалась через флуоресценцию в окружающую среду, причем на длинах волн, которые смогли использовать формирующиеся фотосинтезирующие организмы. Через 2.5–2.0 млрд лет Солнце вышло на близкий к современному режим циклической динамики, однако эволюционные адаптационные механизмы проявляются и в современных живых системах, от дрожжевых клеток до человека. Вопрос об активности молодого Солнца и интенсивности космических лучей в ранней Солнечной системе оказывается важным не только для моделирования биосферы ранней Земли, но и для рассмотрения астробиологических вопросов возможности существования жизни на спутниках планет-гигантов и экзопланетах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 17 Президиума РАН «Эволюция органического мира и планетарных процессов» и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-52-06002-Аз\_а).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. В. Рагульская, *Солнце и биосфера: миллиарды лет вместе* (Радиотехника, М., 2019). URL: <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Ragulskaya-Sun-2019.pdf>
2. Е. Г. Храмова, в кн. *Жизнь и Вселенная*, под ред. В. Н. Обридо и М. В. Рагульской (ООО «Изд-во ВВМ», СПб., 2017). URL: <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Life-n-Universe.pdf>.
3. М. Никитин, *Происхождение жизни: от туманности до клетки* (Изд-во АНФ, М., 2016)
4. М. В. Рагульская, *Технологии живых систем* **16** (5), 60 (2019).
5. В. А. Твердислов и Е. В. Малышко, *Успехи физ. наук* **189** (4), 375 (2019).
6. А. Y. Mulkidjan and M. Y. Galperin, *Biol. Direct* **4**, 27 (2009).
7. А. Б. Струминский, Дис. ... докт. ф.-м. н., М., 2011.
8. I. A. Mironova, et al., *J. Atmospher. Solar-Terrest. Phys.* **149**, 146 (2016).
9. О. В. Кочина, Д. З. Вибе, С. В. Каленский и А. И. Васюнин, *Астрон. журн.* **90**, 892 (2013).
10. Th. Henning and D. Semenov, *Chem. Rev.* **113**, 9016 (2013).
11. K. I. Öberg, V. V. Guzmán, K. Furuya, et al., *Nature* **520**, 198 (2015).
12. D. Atri and A. Melot, *Astroparticle Phys.* **53**, 186 (2014).
13. K. Wyman and S. Redfield, *Astrophys. J.* **773**, A96 (2013).
14. Q. Pognan, C. Garraffo, O. Cohen, et al., *Astrophys. J.* **856**, 1 (2018).
15. N. J. Shaviv, *New Astronomy* **8**, 39 (2003).
16. H. Svensmark, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **423** (2), 1234 (2012).
17. В. С. Мурзин, *Введение в физику космических лучей* (Изд-во МГУ, М., 1988).
18. N. K. Belisheva, H. Lammer, et al., *Astrophys. Space Sci. Trans.* **8**, 7 (2012). DOI: 10.5194/astra-8-7-2012
19. E. Gromozova, et al., *Sun and Geosphere* **7** (2), 117 (2012).
20. M. V. Ragul'skaya, E. A. Rudenchik, S. M. Chibisov, and E. N. Gromozova, *Bul. Exp. Biol. Med.* **159** (2), 269 (2015). DOI: 10.1007/s10517-015-2939-0
21. M. Güdel, *Living Rev. Solar Phys.* **4**, Art. nu. 3 (2007). DOI: 10.12942/lrsp-2007-3
22. В. Н. Обридо и Ю. А. Наговицин, *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (ООО «Изд-во ВВМ», СПб., 2017).

23. V. V. Pipin, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **466** (3), 3007 (2017).
24. М. В. Рагульская, *Земля и Вселенная*, № 3, 91 (2017).
25. E. Gaucher, et al., *Nature* **451** (7179), 704 (2008).
26. C. Goldblatt and K. Zahnle, *Nature* **474**, E1 (2011). DOI: 10.1038/nature09961
27. V. Obridko, M. Ragulskaaya, and E. Khramova, *J. Atmospher. Solar-Terrest. Phys.* **197** (2020).
28. Т. Абд Дейдан, С. В. Пацаева, В. В. Фадеев и В. И. Южаков, *Вестн. МГУ, сер. 3. Физика. Астрономия* **35** (2), 51 (1994).
29. Т. С. Идрисов, М. А. Курбанов и У. А. Кулиева, *Хим. безопасность* **2** (2), 106 (2018).
30. E. Khramova, *J. Atmospher. Solar-Terrest. Phys.* **197** (2020).
31. Ю. И. Гурфинкель, *Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность* (Изд-во «Эльф-3», М., 2004).
32. V. S. Cheptsov, et al., *Geosciences*, № 8, 298 (2018).
33. M. Simakov, in *Origins: Genesis, Evolution and Diversity of Life*, Ed. by J. Seckbach (Kluwer, 2004), pp. 645–665.
34. А. М. Садовский, А. Б. Струминский и А. В. Белов, *Письма в Астрономич. журн.: Астрономия и космическая астрофизика* **44** (5), 347 (2018).
35. F. Westall, et al., *Astrobiology* **15**, 998 (2015).
36. В. В. Вишневецкий, М. В. Рагульская и С. Н. Самсонов, *Технологии живых систем*, № 4, 61 (2007).
37. М. В. Рагульская и В. В. Пипин, *Динамика сложных систем*, **1** (1), 17 (2010).
38. *Биотропное воздействие космической погоды*, под ред М. В. Рагульской (ООО «Изд-во ВВМ», СПб., 2010).
39. V. Obridko, M. Ragulskaaya, E. Rudenchik, et al., *Technologies Live Systems*, **11** (3), 12 (2014).
40. С. М. Чибисов, Г. С. Катинас и М. В. Рагульская, *Биоритмы и космос: мониторинг космо-биосферных связей* (М., 2013).
41. М. В. Рагульская, В. Н. Обридко и Е. Г. Храмова, в сб. *Материалы VI Съезда биофизиков России*, (Сочи, 2019), сс. 367–368.

## Galactic Factors, the Young Sun and Earth, and Biophysics of Living Systems

M.V. Ragulskaaya, V.N. Obridko, and E.G. Khramova

*Institute of Terrestrial Magnetism and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences,  
Kaluzhskoye shosse 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

The factor of the radiation effects of the young Sun and galactic cosmic rays on physical conditions on the early Earth and is significantly underestimated while studying problems related to the origin and evolution of the biosphere. This paper reviews the dynamics of solar and galactic processes over 4.56 billion years of the existence of the solar system. These factors had a significant impact on the formation of adaptive technologies of living systems in ancient and modern times. The features of the biosphere development on the early Earth under a faint but more flash-active young Sun are considered. The radiation spectrum of the young Sun and the paradox of the mismatch between the solar radiation and the chlorophyll absorption spectrum are discussed. The ways of solving this paradox are proposed. The role of solar radiation when studying models of the Earth's early biosphere and hypothetical biospheres of the giant planets satellites and exoplanets is highlighted.

*Keywords: cosmic rays, faint young Sun radiation, primary biosphere, life origin, photosynthesis, biophysics of living systems*