Обзор

Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований

Обридко В.Н., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Мирошниченко Л.И., Храмова Е.Г.

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

Поступила в редакцию 22 апреля 2015 г., Принята в печать 1 июня 2015 г.

© 2015, Обридко В.Н., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Мирошниченко Л.И., Храмова Е.Г.
© 2015, Психосоматические и интегративные исследования

Резюме:

Основным фактором, определяющим вариации космической погоды в Солнечной системе, является динамика Солнца. За время своего существования Солнце, как звезда, прошла большой путь эволюционного развития, и в момент зарождения жизни на Земле тип активности, масса и период обращения раннего Солнца существенно отличались от современных. Незнание этих особенностей функционирования ранней Солнечной системы приводит к неправильным моделям формирования жизни. Жизнь на земле появилась тогда, когда условия функционирования Солнца ей это позволили, т.е. тогда, когда из «звезды разрушения» наше светило стало «звездой созидания». Можно также предположить, что наблюдаемые современные нелинейные адаптационные механизмы биообъектов к слабым воздействиям внешней среды являются атавистическими проявлениями эволюционной адаптации древних экосистем, в период существенно нелинейной (и более интенсивной) динамики древнего Солнца 3,8 - 4 млрд. лет назад.

Нами рассматриваются солнечно-земные связи и их влияние на разнообразие форм жизни и биологические процессы на разных временных этапах. В исследовании происхождения жизни следует рассматривать не только наземные условия, но также и систему солнечно-земных связей в целом. В период формирования жизни (3.8 – 4 млрд. лет назад) активность раннего Солнца была намного более интенсивной и хаотичной. Показатели спектрального излучения древнего Солнца отличались от современных. Так, интенсивность УФ- и рентгеновского излучения могла превышать текущий уровень в 10-100 раз. Интенсивность космического излучения в разные периоды развития биосферы могла превышать текущий уровень вплоть до 6-10 раз. Масса раннего Солнца была около 107 % от его текущей массы. В соответствии с законами гравитации данный факт имеет огромное значение для слияния Солнечно-Земных связей, в том числе геомагнитная активность и средняя температура поверхности ранней Земли. Убыль массы раннего Солнца с солнечным ветром также значительно превышали текущий уровень. Влияние космического и ультрафиолетового излучения и геомагнитного поля на жизнь на земле в период формирования отражается в современных процессах в биосфере, которые можно изучать экспериментальным путем. Принимаются во внимание экспериментальные медико-биологические данные Института земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, а также исторические и палео-данные. Настоящее исследование проведено при поддержке РАН в рамках Программы 28 "Происхождение жизни и развитие биосферы". В статье рассмотрены параметры активности Солнца и космической погоды в эпоху формирования жизни на Земле и их возможный вклад в зарождение жизни. Обсуждается роль космических лучей, гелиосферы и атмосферы в развитии биосферы Земли, а также роль вспышек сверхновых в процессах массовых вымираний живых организмов.

Ключевые слова: солнечно-земные связи, адаптация живых систем и происхождение жизни, биотропные эффекты космической погоды

Библиографическая ссылка: Обридко В.Н., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Мирошниченко Л.И., Храмова Е.Г. Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований. Психосоматические и интегративные исследования 2015; 1: 0101.

Review

Cosmophysical factors of evolution of biosphere: new lines of research

Obridko V.N., Ragulskaya M.V., Khabarova O.V., Miroshnichenko L.I., Khramova E.G.

Institute of Terrestrial Magnetism (IZMIRAN), Moscow, Russian Federation

Received on 22 April 2015, Accepted on 1 June 2015

© 2015, Obridko V.N., Ragulskaya M.V., Khabarova O.V., Miroshnichenko L.I., Khramova E.G.
© 2015, Psychosomatic and Integrative Research

Summary:

The effect of the early and modern Sun on the origin and development of life on the Earth is discussed. The main factor determining variations of space weather in the Solar system is dynamics of Sun. Sun as a star throughout its existence passed the long way of evolutionary development, and at the moment of the germ of life on Earth the activity, weight and period of rotation of early Sun differed from the modern metrics so much. Lack of knowledge about these early Solar system's performance features provides the wrong models of the formation of life. The terrestrial life appeared when it became possible due to Sun operating procedures, i.e. when our star became not a «destruction star» but a «creation star». We may also assume that the observed modern nonlinear adaptation mechanisms of biological objects to mild exposure of ambients are atavistic display of evolutionary adaptation of the ancient ecosystems, at the period of highly nonlinear (and more intense) dynamics of early Sun 3,8 - 4 billion years ago.

We pay attention to the solar-terrestrial relationships and their impacts on biodiversity and biological processes at different time scales. In the study of the origin of life not only the ground conditions should be considered, but also we should pay attention to a system of solar-terrestrial relationships in general. During the formation of life (3.8 – 4 billion years ago) the activity of early Sun was much more intense and chaotic. Spectral emission characteristics of the old Sun differed from modern values. So the intensity of radiation in the ultraviolet and X-rays could exceed the current level 10-100 times. The intensity of cosmic rays at different periods of development of the biosphere could exceed the current level up to 6-10 times. The inert weight of early Sun was about 107 % of current Sun inert weight. According to the lows of gravitation this fact has great authority at the fusion of Sun-Earth links, including geomagnetic activity and average temperature of the surface of early Earth. Outflow of the mass of early Sun with the solar wind also considerably exceeded the current level. The influence of cosmic rays, ultraviolet and geomagnetic field on early life has its signs in modern biosphere processes, which may be studied experimentally. IZMIRAN experimental bio-medical data as well as historical and paleo-data bases are taken into consideration.
The study is supported by the RAS in the frame of Program 28 "Origin of live and the biosphere development".

Keywords: Solar-Terrestrial connections, Adaptation of life systems and the Origin of life, Biotropic effects of Cosmic weather

Cite as Obridko V.N., Ragulskaya M.V., Khabarova O.V., Miroshnichenko L.I., Khramova E.G. Cosmophysical factors of evolution of biosphere: new lines of research. Psychosomatic and Integrative Research 2015; 1: 0101.

Введение

Основным фактором, определяющим вариации космической погоды и глобальных биосферных процессов в Солнечной системе, является динамика Солнца. Вопросы о формировании адаптационных стратегий современных биосистем были бы неполными, если бы мы не попытались оценить степень возможного влияния активности древнего Солнца и галактических процессов на формирование и развитие биосферы Земли. Совокупность имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных приводит к мысли, что наблюдаемые в настоящее время эффекты адаптации биосистем к космо-геофизическим воздействиям по сути своей являются атавизмами. Программы реагирования эталонных клеточных структур на вариации космических лучей, а также наблюдаемая многочисленными исследователями адаптационная реакция на низко - амплитудные экзогенные воздействия, скорее всего являются оставшимися с тех древних времен. Тогда излучение Солнца было существенно больше и являлось реальным разрушающим фактором для только что сформировавшейся жизни на Земле.

За последние 15 лет в данной области ярко проявились три новые исследовательские тенденции:

1.Резко активировалось развитие астробиологии, причем упор в вопросах происхождения жизни и формировании ранних экосистем постепенно смещается в более физическую, «астро»- часть этой науки. Последние данные о наличии воды в твердом виде (на Марсе) и жидком – на спутниках Юпитера, а также данные об успешных путешествиях метеоритных бактериоглобул в межпланетном пространстве, заставляют более подробно рассматривать условия существования Солнечной системы эпохи формирования жизни на Земле. А значит – рассматривать условия зарождения древних биологических ритмов и видеть их проявления в современных адаптационных ритмах биосистем различного уровня организации.

2.Появились результаты поиска и изучения звезд солнцеподобного типа (например, благодаря программе «Sun-in-time»). Информация об их динамике, периодике и типах активности позволяет определить место нашего Солнца (и сформировавшейся под его влиянием биосферы Земли) среди своих галактических собратьев, а также оценить величину космогенных катаклизмов, обрушивавшихся в свое время на древнюю Землю.

3.Современные технологии снятия, обработки и хранения биомедицинской информации больших массивов данных открыли возможность проведения длительных мониторинговых экспериментов со скважностью измерений менее 1 суток и длительностью более нескольких лет. Полученные знания выдвинули новые требования к анализу хронобиологических особенностей изучаемых систем, и выявили новые технологии подстройки биологических объектов к космогеофизическим факторам.

Солнце, как основной регулятор ритмов оболочек Земли и Солнечной системы

Нравится нам или не нравится, но все физические процессы, происходящие в Солнечной системе (и во всех оболочках Земли, от литосферы до биосферы и ионосферы), модулируются процессами, происходящими на Солнце. Присутствие как импульсных, так и периодических солнечных составляющих наблюдается во всех геофизических или биологических данных. Динамика Солнца определяет вариации космических лучей в межпланетном пространстве, периодичность геомагнитных бурь, 11-летнюю цикличность возникновения инфекционных колебаний, динамику цен на зерно в районах рискованного земледелия и даже глобальные долгопериодические изменения климата.

© 2015, LLC Science and Innovations, Saratov, Russia

Итак, основным фактором, определяющим вариации космической погоды в Солнечной системе, является динамика Солнца. Возраст Солнца составляет приблизительно 4,59 млд. лет. Историю развития Солнца можно условно разделить на 3 периода:

1. Раннее Солнце – первые 1- 10 млн. лет;

2. Молодое Солнце – возраст до 1 млрд. лет, т.е. до 3,5 млрд. лет назад;

3. Современное Солнце – от 3,5 млрд. лет назад по настоящее время.

Последний период объединен условно, возможно новые данные, полученные по программе исследований других звезд солнечного типа, позволят провести более тщательную детализацию.

За время своего существования Солнце как звезда прошло большой путь эволюционного развития. И в момент зарождения жизни на Земле тип активности, масса и период обращения раннего Солнца существенно отличались от современных.

Повторим еще раз: возраст Солнца – около 4,5 млд. лет. Достоверные материальные свидетельства датируют наличие биосферы Земли около 3,8 млд. лет назад. Однако существуют весьма веские доводы, приводимые например, председателем Научного Совета РАН по астробиологии академиком А. Ю. Розановым, что жизнь на Земле появилась значительно раньше, в период от 4,2 до 4 млд. лет назад, и она была занесена сюда метеоритами. В первый миллиард лет своего развития, т.е. как раз в период возникновения земной жизни и формирования древнейших экосистем, Солнце было совершенно другим. Оно имело большую массу, существенно меньший период обращения, а главное – совершенно другой, более интенсивный и спорадический тип активности. Т.е. процессы обмена энергией и веществом шли в солнечной системе более активно и по другим законам.

На Рисунке 1. приведена условная картина эволюционной динамики активности Солнца, от периода раннего Солнца (менее 300 млн. лет от рождения) – слева, до современного Солнца – справа. Еще раз подчеркнем, что это именно качественное сравнительное изображение, а не результат математического моделирования. Верхний ряд представляет собой художественную интерполяцию пятнообразовательной активности Солнца на различных этапах своего развития, нижний ряд показывает распространение солнечного ветра и излучения в межпланетное пространство солнечной системы.

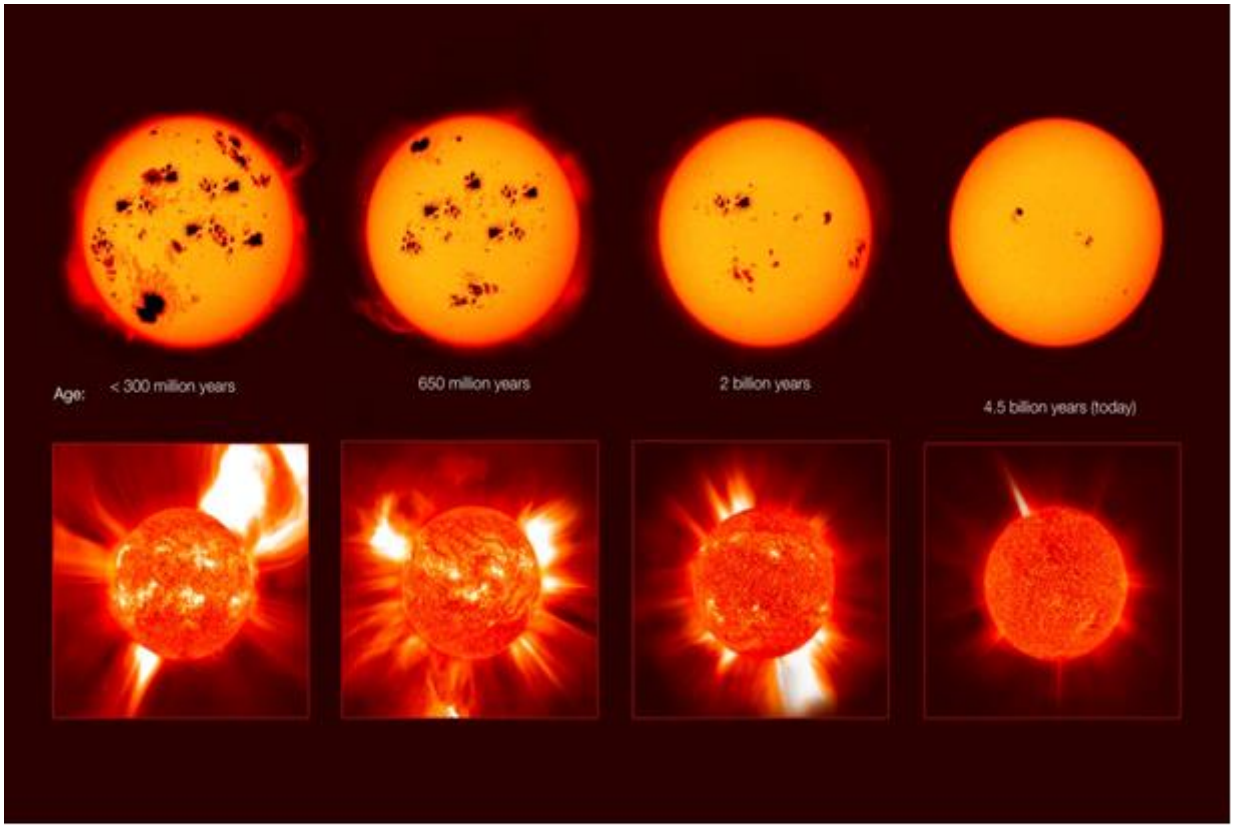


Рисунок 1. Схематическое изображение эволюционной динамики Солнца за последние 4,5 млд. лет (NASA).

Незнание этих особенностей функционирования ранней Солнечной системы приводит к неправильным моделям зарождения жизни. Жизнь на Земле появилась тогда, когда ей это позволили не только условия наземной окружающей среды, но и условия в окружающем космическом пространстве, т.е. тогда, когда из «звезды разрушения» наше светило стало «звездой созидания». Можно также предположить, что наблюдаемые современные нелинейные адаптационные механизмы биообъектов к слабым воздействиям внешней среды являются атавистическими проявлениями эволюционной адаптации древних экосистем в период существенно нелинейной (и более интенсивной) динамики древнего Солнца 3,8 - 4 млрд. лет назад.

Солнце и солнцеподобные звезды

Наше Солнце является звездой второго поколения, образовавшейся из остатков газопылевого облака после вспышки сверхновых звезд первого поколения. Без доставшегося от них «по наследству» железа, кислорода и других более тяжелых элементов таблицы Менделеева формирование жизни известного нам типа в солнечной или любой другой планетной системе было бы невозможно. Как красиво сформулировано на одном из сайтов, посвященных проблеме эволюции звезд, «мы есть ни что иное, как звездная пыль» (http://cosmosfera.ru/index.php?categoryid=9&p2_articleid=514). Там же приведено краткое описание эволюции звезд умеренной массы (звезд солнечного типа): «Звезда зарождается и выходит на ветвь Главной последовательности, занимая на ней строго отведенное место, согласно своим начальным параметрам. На Главной последовательности звезда проводит большую часть своей жизни, расходуя постепенно ядерное горючее. Затем на стадии расширения она уходит в область красных гигантов, по окончании которой выходит в полосу нестабильности и, сбросив конвективную оболочку, превращается в планетарную туманность. Оставшееся ядро, сжимаясь, эволюционирует в белый карлик. А планетарная туманность постепенно рассеивается в космосе, отдавая межзвездной среде составлявшие ее химические элементы».

Эволюция звезд, в частности Солнца, является классической проблемой астрофизики. Внутреннее строение звезды меняется во времени вследствие гравитационного сжатия и ядерных реакций, начинающихся в её центральных областях. На некоторой стадии эволюции звезды малой массы у неё формируется поверхностная конвективная зона и развиваются процессы типа солнечной активности. Звёзды поздних спектральных классов моложе Солнца группируются в рассеянных звёздных скоплениях. Большинство звёзд каждого из этих скоплений характеризуется определенным значением: от 30 млн лет (скопление IC 2391) до 600 млн лет (скопление Hyades – Гиады). Самые молодые звёзды типа T Tau – (T Тельца) наблюдаются в комплексах, где происходит звёздообразование. Уже первые результаты изучения звездной активности показали, что её уровень определяется скоростью осевого вращения звезды. Поэтому основным фактором, определяющим эволюцию активности, является потеря углового момента количества вращательного движения. Для звёзд солнечной массы этот процесс замедления вращения происходит быстро, за время порядка 1 млн лет. Соответственно активность звёзды на протяжении первого периода жизни меняется достаточно быстро, а затем она выходит на квазистационарный уровень, характеризующийся циклическими изменениями.

В настоящее время в интернете (да и в специальной литературе) часто можно встретить фразу «Солнце – обычная звезда своего класса». Но так ли одинаковы солнцеподобные звезды, и какое место среди них занимает наше Солнце? В последние 15 лет многие особенности жизни таких звезд были изучены с высокой точностью в проекте “Солнце во времени”. И оказалось, что наше Солнце – скорее «выродок» в стройном строю своих собратьев, чем типичный его представитель. Или, выражаясь более корректным языком математической статистики, динамические показатели Солнца находятся либо в конце распределения стандартной звездной последовательности, либо образуют отдельную подпоследовательность.

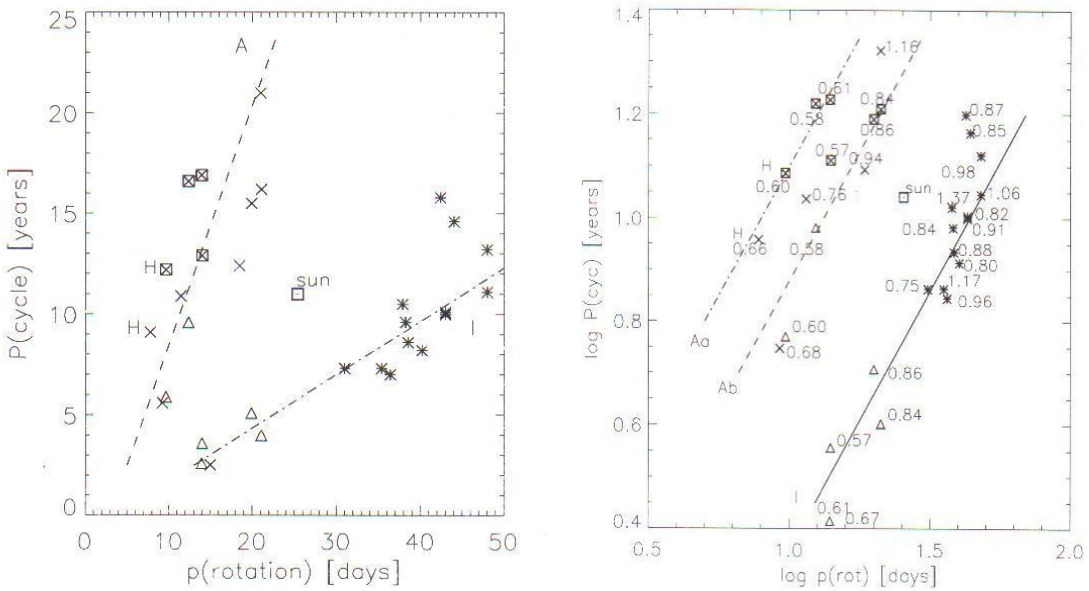


Рисунок 2. Зависимость периода цикла солнцеподобных звезд (годы) от периода вращения звезды (сутки), слева - по работе (Brandenburg at al., 1999), справа – по работе (Bohm-Vitense, 2006). Квадратом и надписью «Sun» отмечено положение параметров Солнца на общем графике.

С точки зрения хронобиологии, основной вопрос, который нас интересует, это собственные ритмы солнцеподобных звезд, т.е. периоды их обращения вокруг своей оси и формирование циклической активности, а также временные соотношения между этими параметрами. Это простое соотношение является проявлением более глубинных взаимосвязей между различными типами магнитных полей звезды и дифференциальным вращением. В современном Солнце соотношение между периодом обращение

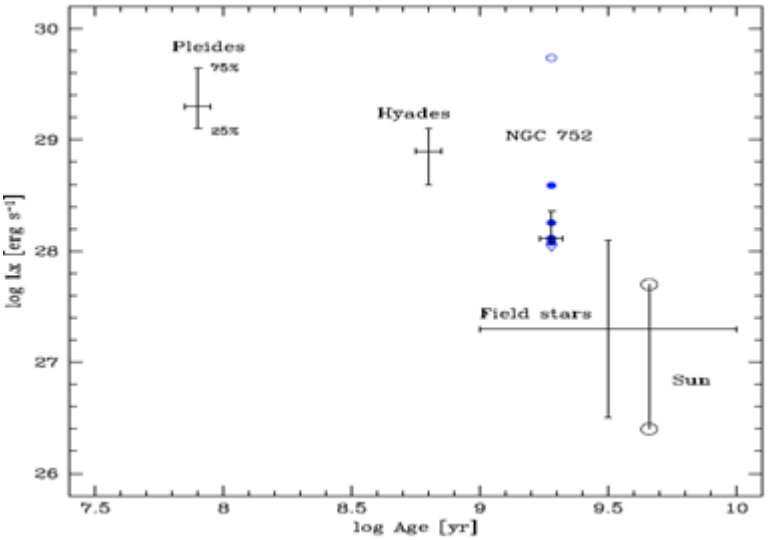
вокруг оси (27-29 дней) и периодом солнечной активности (11 лет) составляет около 150. На Рисунке 2.а приведена зависимость периода цикла от периода вращения из классической работы [1]. Видно, что Солнце находится практически посередине между двумя основными ветвями параметров звезд солнцеподобного типа, не примыкая ни к одной из них. На Рисунке 2.б в логарифмическом масштабе приведены уточненные данные по большему количеству звезд из статьи [2].

По уточненным данным 2006 года одна из первичных последовательностей распадается на две подпоследовательности, но даже в этом случае наше светило ухитряется занять совершенно особое место. Автор вполне резонно задает вопрос, не эта ли исключительность Солнца позволила сформироваться жизни именно в Солнечной системе?

Также из наблюдений за солнцеподобными звездами известно, что с течением времени звезда экспоненциально замедляет свое дифференциальное значение. Эта закономерность позволяет произвести оценку – для молодого Солнца период обращения составлял около 10 дней, быстро увеличиваясь в течение первого миллиарда лет существования нашей звезды. Поэтому при анализе динамических спектров клеточных биологических объектов необходимо уделить особое внимание периодам, более коротким, чем современные 27 суток оборота Солнца. Возможно, именно они являются отражением ритмики древнего Солнца в эпоху формирования жизни на Земле.

Вопрос о том, наблюдалась ли в древнем Солнце периодическая активность, и в какой момент возникли регулярные солнечные циклы, а также, какова была их максимальная величина, составляет отдельную задачу физики Солнца, и начинает прорабатываться только сейчас. Существенное увеличение количества звёзд с активностью солнечного типа произошло при реализации программы поиска планет вне солнечной системы. Их изучение дало первые указания на то, что хромосферная активность Солнца несколько выше, чем у других звёзд поля в солнечной окрестности. Если полная светимость Солнца, определяющаяся его излучением в оптическом диапазоне, мало меняется в ходе эволюции, то излучение внешней атмосферы (хромосферы и короны), особенно в крайней ультрафиолетовой и рентгеновской областях, кардинально изменяется. Ослабление рентгеновской светимости (или мощности короны) связано, конечно, с замедлением вращения. Кстати, это один из способов определения возраста звезды.

Сопоставление рентгеновского излучения звезд разных возрастов показывает [3], что рентгеновское излучение для молодого Солнца должно было быть на 3-4 порядка больше нынешнего (рис.3).



Яркость и активность родительской звезды эволюционирует, границы зоны обитания изменяются в течение ее жизни. В частности, из работы [4] можно заключить, что 3.5 млрд. лет назад интегральный солнечный поток в диапазоне 0.1 – 120 нм был в 6 раз выше по сравнению с современным состоянием. В течение же первых 100 млн. лет, когда Солнце достигло главной последовательности в точке нулевого возраста, поток излучения был до 100 раз более интенсивен, чем поток Солнца сегодня. Зависимость «возраст-активность» указывает, что менее массивные звезды проводят больше времени в этой очень активной, насыщенной стадии перед началом падения их активности. В частности, звезды солнечного типа остаются на насыщенных уровнях излучения, пока не достигнут возраста ~100 млн. лет, затем их рентгеновское излучение и тепловое рентгеновское излучение (SXR-излучение) быстро уменьшаются как функция возраста, следуя степенному закону [5].

Таким образом, изучение солнцеподобных звезд и сравнительный анализ их динамики с динамикой Солнца показали, что на ранней стадии эволюции все эффекты солнечной активности были значительно (на 3-4 порядка) более сильными, чем наблюдаемые сегодня. Поэтому зависимость в состоянии различных оболочек Земли и биологических эффектов от солнечной активности была более выражена. Можно предположить, что именно на Земле эти эффекты не были катастрофическими. Для Венеры и Марса условия формирования жизни были менее благоприятными. Этот вопрос мы обсудим подробнее чуть ниже. Однако, прежде чем перейти к его рассмотрению, напомним основные понятия и величины, которыми оперирует физика современного Солнца.

Современное Солнце и солнечно-земные связи

Современное Солнце – раскаленный плазменный шар с протекающими внутри него непрерывными термоядерными реакциями и обладающий собственным магнитным полем. Совокупность магнитных полей Солнца формирует вокруг него пространственную динамическую структуру, называемую гелиосферой. Гелиосфера отделяет солнечную систему от окружающего галактического пространства. Строение гелиосферы приведено на Рисунке 4.

Рисунок 4. Строение современной гелиосферы и гелиопаузы.

Масса современного Солнца ~1,989•1030 кг (~333000 масс Земли), средний радиус приблизительно равен 110 радиусов Земли. Структура Солнца, изученная на данный момент, приведена на Рисунке 5.

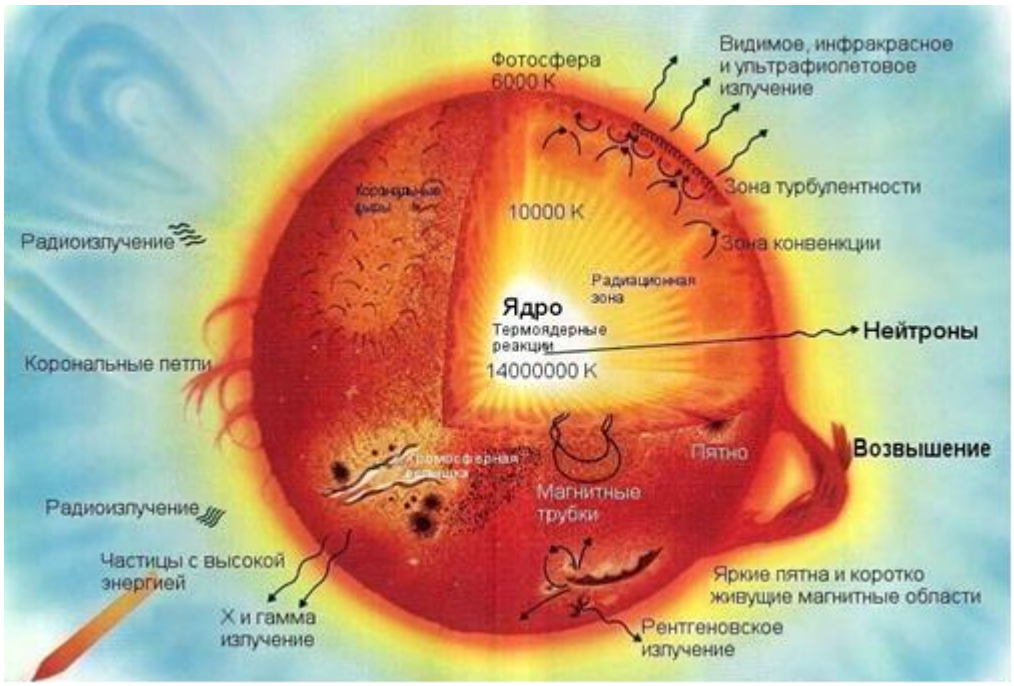


Рисунок 5. Схематическое строение Солнца (http://www.izmiran.rssi.ru/edu/kids/sun_rad.html).

Строение современного Солнца можно условно разделить на 2 области, внешнюю и внутреннюю.

Внутреннее строение:

Ядро

Зона лучистого переноса

Конвективная зона

Внешняя атмосфера Солнца:

Фотосфера

Хромосфера

Корона

Солнечный ветер

Для биологических вопросов особое значение имеют процессы, протекающие во внешних оболочках Солнца. Именно их историческую динамику мы будем рассматривать в дальнейшем. В настоящее время период обращения Солнца зависит от широты и составляет от 25 дней на экваторе до 34 дней на полюсах (относительно звёзд) или 27 и 32 суток (относительно Земли). Зависимость периода вращения от широты является следствием нежесткой структуры плазменного шара и наличием эффектов инерции. Средний период вращения активных областей, события в которых важны для процессов на Земле, составляет около 27-29 дней.

Магнитное поле Солнца. Солнечный цикл.

Магнитное поле Солнца можно подразделить на крупномасштабное поле, схематически изображенное на Рисунке 6 (размеры порядка радиуса Солнца, характерные временные процессы – порядка солнечного цикла) и мелкомасштабное поле, которое наблюдается в виде многообразных структур и определяется процессами магнитной конвекции. Дифференциальное вращение и циклоническая конвекция, взаимодействуя с крупномасштабными и мелкомасштабными магнитными полями, приводит к циклической магнитной активности современного Солнца. Условно процесс формирования солнечной цикличности показан на Рисунке 6. Процесс протекает от стадии А к стадии С.

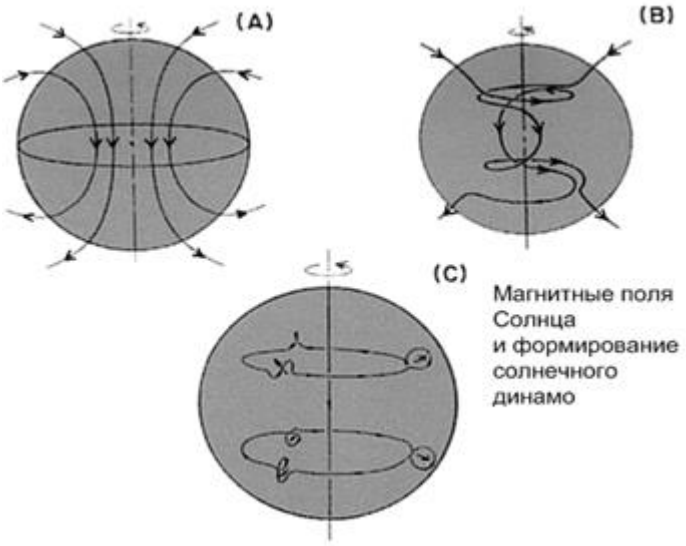


Рисунок 6. Схема формирования солнечного динамо. Следует иметь в виду, что в реальности магнитные поля не проходят через центр звезды.

Именно соотношение интенсивностей вращения и конвекции (изменяющееся по мере старения звезды) определяет тип активности, процессы формирования цикличности и период обращения любой звезды.

В настоящее время основной теорией, описывающей крупномасштабные изменения магнитного поля Солнца, является теория магнитогидродинамической генерации (МГД - генерации) или теория солнечного динамо, опирающаяся на представления о среднем магнитном поле Солнца и разделении масштабов динамики течений и магнитных полей. Последнее приводит к существенным ограничениям, поскольку не позволяет описать одновременную динамику крупных и мелких масштабов в рамках одной модели. Поэтому природу солнечного цикла и основные проявления солнечной активности, такие как вспышки, корональные выбросы масс, солнечные пятна и т.д. приходится рассматривать как отдельные, хотя и взаимосвязанные, явления [6].

Магнитосфера Солнца (совокупность магнитных полей Солнца) распространяется, по крайней мере, до астрономических границ Солнечной системы. Смена магнитных полюсов Солнца в данную историческую эпоху происходит каждые 10-11 лет, полный цикл составляет около 22 лет, хотя вопрос о стабильности существования квази-одиннадцатилетнего солнечного цикла постоянно дискутируется. Даже на протяжении инструментальных измерений Солнца известен период, когда пятна на Солнце отсутствовали на протяжении 70 лет (так называемый «Маундеровский минимум солнечной активности» 1645-1715 гг.). На Рисунке 7 показана история солнечной активности с 1600 г. Видно практическое отсутствие выраженной периодики до начала 18 века.

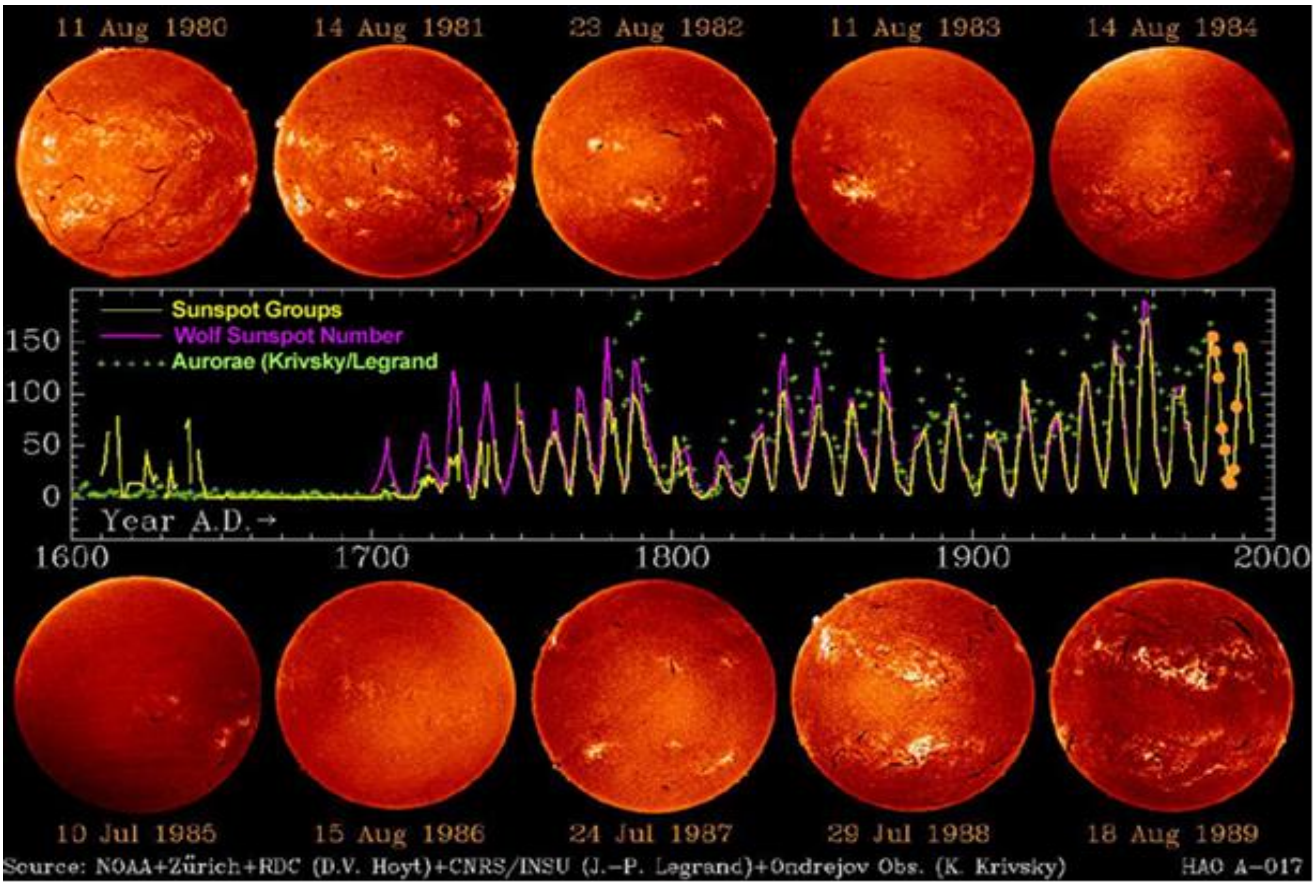


Рисунок 7. Динамика солнечной активности за последние 400 лет.

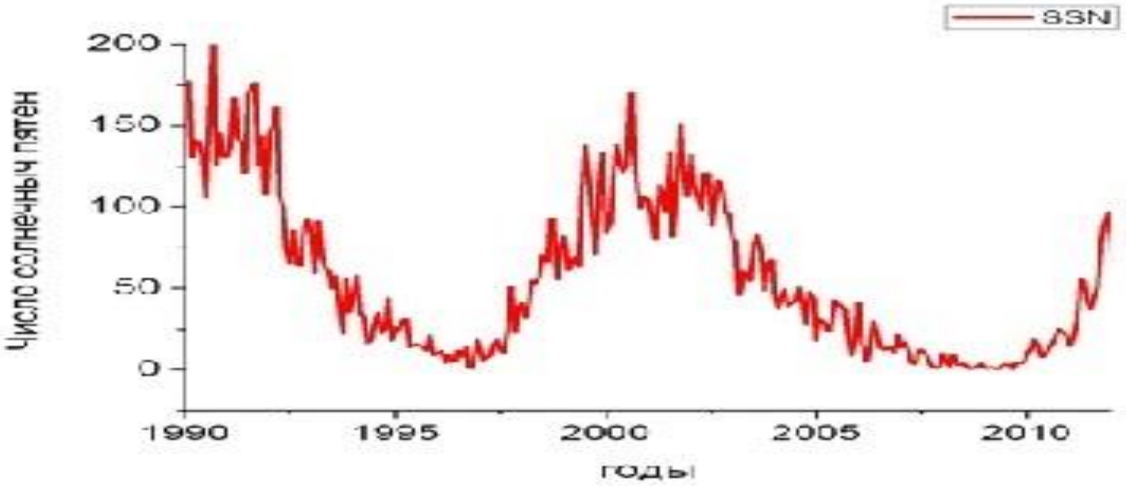


Рисунок 8. Динамика солнечных пятен с 1990 по 2011 год.

Максимум солнечной активности определяется по количеству вспышечных процессов, числу активных областей и по интенсивности радиоизлучения. Максимумы, детектируемые по этим параметрам, обычно не совпадают во времени и могут быть сдвинуты друг относительно друга в пределах года – полутора. Так, в прошедшем, 23-м цикле солнечной активности, наблюдался двугорбый максимум солнечных пятен в 2000 г. и в 2002 году, максимум вспышечных процессов пришелся на 2001-ый, а максимум радиоизлучения – на начало 2002-го года. Число солнечных пятен с 1990 до середины 2010 года приведено на Рисунке 8. Наблюдается выраженная периодичность с быстрой нарастающей ветвью цикла и более медленной – спадающей. В настоящее время Солнечная система проходит через максимум 24 цикла (от начала инструментальных наблюдений).

Наличие нестационарного магнитного поля Солнца приводит к проявлению солнечной активности в виде вспышечных процессов, особенно в максимуме цикла. В минимуме солнечного цикла активность Солнца определяется в основном корональными дырами.

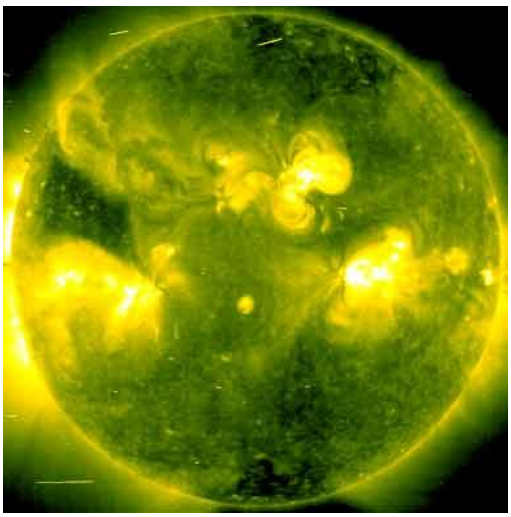
Активные процессы на Солнце. Вспышки, выбросы корональной массы и их воздействие на Землю

Вспышки - самые яркие проявления солнечной активности. Они представляют собой взрывообразное освобождение высокоэнергичного электромагнитного и корпускулярного излучения в пределах четко ограниченных участков активных областей, обладающих магнитными полями сложной структуры. Зачастую вспышки связаны с выбросами корональной массы (coronal mass ejection - CME), с приходом которых к Земле ассоциируется значительная часть самых интенсивных магнитных бурь.

Электромагнитное излучение достигает Земли через 8 минут после вспышки на Солнце, вызывая целый комплекс скоррелированных и взаимосвязанных изменений, происходящих одновременно или с некоторой временной задержкой во всех оболочках нашей планеты (магнитосфере, атмосфере, ионосфере, биосфере, гидро- и литосфере). При этом непосредственно до поверхности планеты проходят лишь некоторые виды и частоты излучений. Пропускная способность земной атмосферы для излучений разных длин волн различна, что приводит к существованию оптических окон прозрачности атмосферы Земли.

Излучение в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазоне.

На Рисунке 9 приведен снимок Солнца, полученный 16 января 2005 года в спектральной полосе 284А, а на Рисунок 10 - регистрация в рентгеновском диапазоне нескольких вспышек, произошедших в активных областях, указанных на Рисунке 9.. Электромагнитное излучение в рентгеновском диапазоне 1-8А выросло на 2-2,5 порядка, а в диапазоне 0,5-4 А на 3 порядка Возможны и еще более мощные вспышки, при которых излучение в этих диапазонах может достигать несколько единиц на 10-3 ватт/м2. Резко усиливается и поток ультрафиолетового излучения с длинами волн меньше 1000 А и, в особенности, в диапазоне 300-200 А.



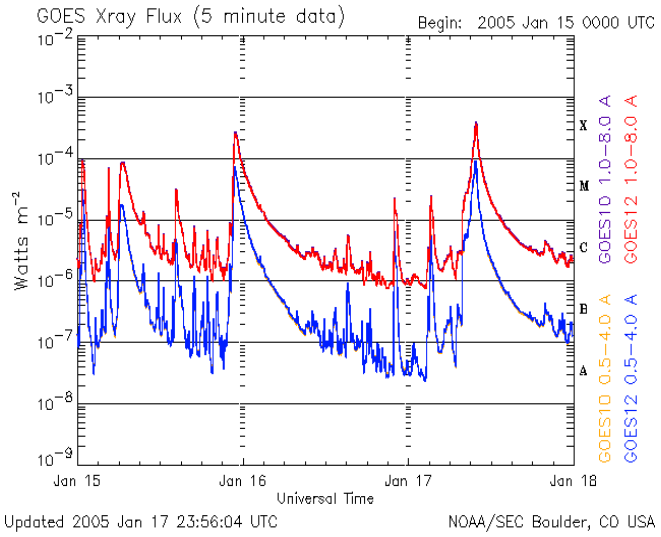


Рисунок 9. Вид Солнца в рентгеновском диапазоне 16 января 2005.

Рисунок 10. Изменение амплитуды рентгеновского излучения Солнца во время вспышки 16 января 2005 года по данным NOAA.

Поток излучения в этих диапазонах, безусловно, биоэффективен, но следует учитывать, что количество ультрафиолетового и рентгеновского излучения на поверхности Земли практически целиком определяется облачностью в конкретной местности, а не солнечной активностью. В целом поток, дошедший до поверхности, зависит от состава и толщины атмосферы, поэтому в период формирования жизни из-за скудности первичной атмосферы, не обогащённой кислородом, неэкранированные потоки рентгеновского и ультрафиолетового излучения могли быть одним из самых мощных биосферообразующих факторов.

Космические лучи

Выброс корональной массы в межпланетное пространство приводит к вариациям интенсивности первичных комических лучей (КЛ) на орбите Земли и на её поверхности (вторичное излучение). В потоке первичных КЛ из Галактики преобладают протоны По количеству частиц ГКЛ на 90 процентов состоят из протонов, на 7 процентов — из ядер гелия, около 1 процента составляют более тяжелые элементы, и около 1 процента приходится на электроны. Галактические космические лучи (ГКЛ) имеют небольшую интенсивность, их поток на орбите Земли практически изотропен, их энергетический спектр – очень широкий, от ~107 до 1019-1020 эВ, но бомбардируют они земную атмосферу постоянно. Существуют также космические лучи сверхвысоких энергий (до 1021 эВ), вероятно, внегалактической природы. Частицы ГКЛ распространяются вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП) из-за внешней границы гелиосферы по направлению к Солнцу, внутри гелиосферы они испытывают значительное рассеяние на неоднородностях ММП. Космические лучи солнечного происхождения (СКЛ) имеют более узкий спектр по энергиям, примерно от ~107 до ≥1010 эВ, и регистрируются на орбите Земли лишь эпизодически. Они возникают во время вспышек и распространяются в направлении от Солнца к границе гелиосферы. До Земли первые частицы СКЛ доходят спустя не менее 10-12 минут после вспышки (релятивистские протоны), причём их интенсивность значительно превышает интенсивность ГКЛ. Мощные потоки солнечных частиц нерелятивистских энергий (≤ 100 МэВ) идут к Земле в течение десятков минут и даже многих часов (в зависимости от энергии частиц).

Путь, которым приходят к Земле ГКЛ, зависит от топологии ММП. Из-за этого интенсивность потока ГКЛ на орбите Земли модулируется солнечной активностью. Механизм модуляции можно пояснить на примере так называемого Форбуш-эффекта. Через 1.5-2.5 дня после выброса корональной массы (CME) регистрируется резкое и существенное понижение интенсивности ГКЛ (Форбуш–понижение). Линии ММП искажаются в результате распространения от Солнца выброса корональной массы (см. рисунок 11). Величина понижения определяется величинами скорости CME и напряженности магнитного поля, а длительность Форбуш-эффекта зависит от геометрических размеров области, возмущенной распространяющимся CME. Минимум интенсивности ГКЛ наблюдается внутри CME.

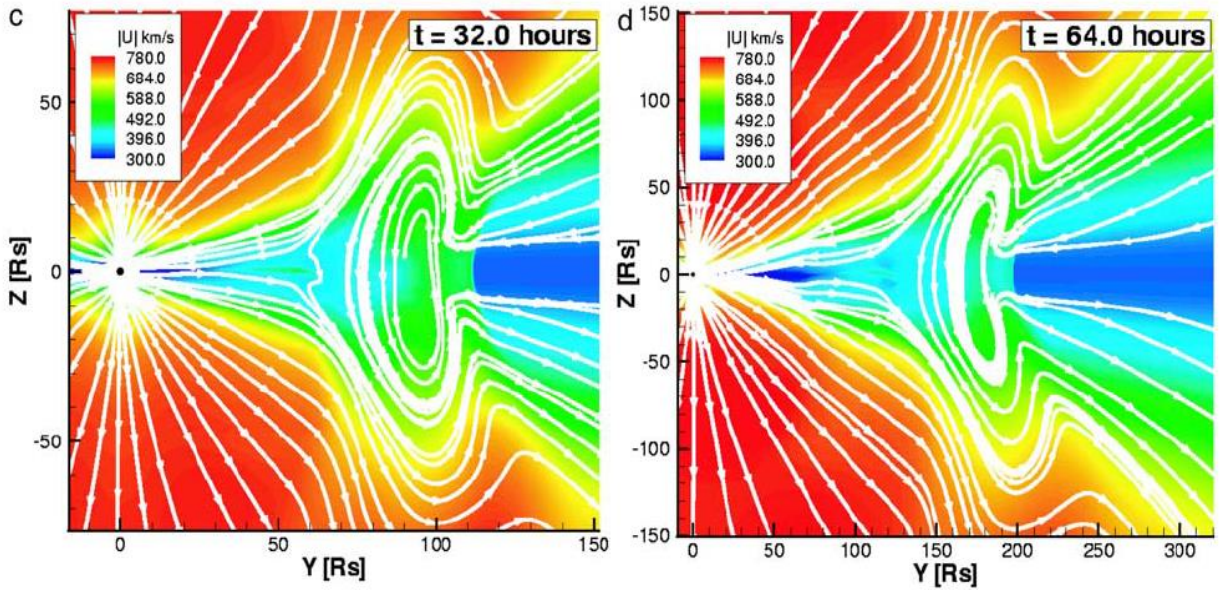


Рисунок 11. Распространение коронального выброса (CME) от Солнца и соответствующее искривление линий межпланетного магнитного поля. Моделирование проведено Manchester et al., 2004.

В связи с тем, что длина свободного пробега КЛ между актами рассеяния сравнима или превышает геометрические размеры выброса, эффект Форбуша наблюдается и вне CME, но его величина в этом случае меньше. Таким образом, чем выше солнечная активность, тем чаще происходят выбросы корональной массы, тем выше поток СКЛ, но ниже поток ГКЛ. Т.е. связь «солнечная активность - интенсивность ГКЛ» - обратная. Похожий механизм модуляции работает и в масштабах 11-летнего солнечного цикла. Эти факты важно учитывать при палеонтологических исследованиях.

Величина Форбуш-понижения зависит от энергии КЛ, при увеличении энергии она уменьшается. Амплитуда Форбуш-понижений, наблюдаемая нейтронными мониторами (НМ) с эффективной энергией регистрации ГКЛ, варьируется примерно от 2% до 20% (в среднем, 2- 2.5 %), а их длительность составляет от полусуток до нескольких дней [7]. Статистическая точность нейтронных мониторов по 1-минутным данным - около 1.5%. Необходимо учитывать, что эффективная энергия регистрации НМ составляет меньше 10 ГэВ, а на других энергиях вышеприведённые значения могут незначительно варьироваться. Форбуш-эффекты более 10% регистрировались всего ~ 20 раз за все время 60-летних наблюдений КЛ. Например, в прошлом цикле 29 октября 2003 г. максимальное падение составило 28%. Падение интенсивности КЛ более 3% при часовом усреднении считается сильным понижением.

Эти кратковременные эффекты позволяют понимать механизм и масштабы вариаций КЛ в современную эпоху. На геологической шкале времени важны, в первую очередь, вариации с циклом около 11 лет и более. Особый интерес представляют возможные спорадические и/или длительные изменения интенсивности КЛ в прошлом. В частности, значительные понижения уровня КЛ, наблюдавшиеся в давнее историческое время и восстановленные по палеонтологическим данным, могут заставить существенно пересмотреть имеющуюся картину солнечно-земной физики [8].

При изучении процессов формирования и развития биосферы необходимо ,принимать во внимание, что динамика Солнечной системы и поступление космических лучей на Землю есть функция как глобальных процессов, охватывающих всю Галактику в целом (например, вспышки сверхновых звезд или излучение из ядра Галактики), так и относящихся непосредственно к нашей Солнечной системе - например, прохождение ею рукавов Галактики (см. рисунок 12).

Рисунок 12. Схема прохождения Солнечной системы через рукава Галактики.

И хотя ранее считалось, что поток ГКЛ в среднем неизменен на протяжении многих миллионов лет, указанные выше процессы могут привести к возникновению долгопериодических (десятки и сотни миллионов лет) вариациям потока ГКЛ. Недавно выяснилось, что существовали и более короткопериодические вариации потока ГКЛ. Обнаружено как минимум три периода (8500–9500 гг. до н.э., 27000–32000 гг. до н.э. и 12000–16000 гг. до н.э.), когда интенсивность ГКЛ падала в 1.5-2 раза. В принципе, подобные понижения потока ГКЛ могли быть непосредственным следствием длительных периодов повышенной солнечной активности [8].

В качестве ещё одного механизма изменения интенсивности ГКЛ при любой солнечной активности можно рассматривать вариации параметров межзвездной среды. Известно, что десятикратное увеличение плотности межзвездного газа на границе Солнечной системы вызывает сжатие гелиосферы на четверть и, соответственно, увеличение интенсивности космических лучей на орбите Земли до 6 раз [9]. Если учитывать, что в рукавах Галактики плотность межзвездного газа имеет именно такой порядок величины, то периодичность вымираний живых организмов на Земле ~ 62 млн. лет [10] вполне может объясняться усиленной бомбардировкой Земли космическими лучами из-за эффекта, описанного выше. В то же время, это может быть связано и с исчезновением ударной волны на границе гелиосферы, где сейчас гасится до 90% интенсивности космических лучей, идущих извне [11]. Наиболее серьёзные исследования в этой области сейчас ведутся в лаборатории проф. Меллота (Канзас, США) (см. дискуссии в статьях на http://kusmos.phsx.ku.edu/~melott/Astrobiology.htm).

Понижение (повышение) потока космических лучей (ГКЛ и СКЛ) при их вторжении в атмосферу Земли, приводит к понижению (повышению) ионизации воздуха, Тем самым КЛ могут активно воздействовать на состав атмосферы и, в конечном счёте, на её динамику, погоду и климат. Итак, по совокупности изученных эффектов, КЛ можно считать одним из основных постоянно действующих биотропных агентов космической погоды.

До 15% ионизирующего излучения, воздействующего на людей на поверхности Земли, определяется космическими лучами, интенсивность которых растёт по мере роста высоты над уровнем моря. При этом важно напомнить, что первичные КЛ до поверхности Земли не доходят (как и ультрафиолетовое излучение). Сталкиваясь с ядрами атомов атмосферы, они порождают многочисленные вторичные частицы (вторичные космические лучи) - протоны, нейтроны, электроны и т.д. (вплоть до нейтрино).

При энергиях выше 1014 эВ первичные КЛ, вызывают так называемые широкие атмосферные ливни вторичных частиц (см., например, [12]). Вследствие наличия у Земли собственного магнитного поля, существует геомагнитный барьер, из-за которого интенсивность КЛ зависит от широты - в пределах полярного овала вплоть до полюсов она максимальная, на экваторе - минимальная. Рассмотрим более подробно особенности этого барьера - магнитосферы нашей планеты - и его взаимодействие с межпланетной средой.

Магнитосфера Земли

Не только космические лучи могут оказывать биоэффективное воздействие на живые организмы. Корпускулярное излучение Солнца распространяется в межпланетной среде со скоростью ~ 400700 км/с и достигает магнитосферы Земли через 1.5 – 3 суток после выброса корональной массы. Спокойный солнечный ветер распространяется ещё медленнее. Возмущения солнечного ветра вызывают вариации или сильные возмущения геомагнитного поля Земли, таким образом, создавая ещё один опосредованный фактор влияния космической погоды на биосферу.

Земля, обладая собственным квази-дипольным магнитным полем, имеет вокруг себя защитную оболочку - магнитосферу, препятствующую непосредственному контакту потоков солнечных электронов и ионов с поверхностью нашей планеты. Вследствие обдувания солнечным ветром, магнитосфера вытянута в направлении «день-ночь», силовые линии диполя оказываются «разомкнутыми» (см. Рисунок 13).

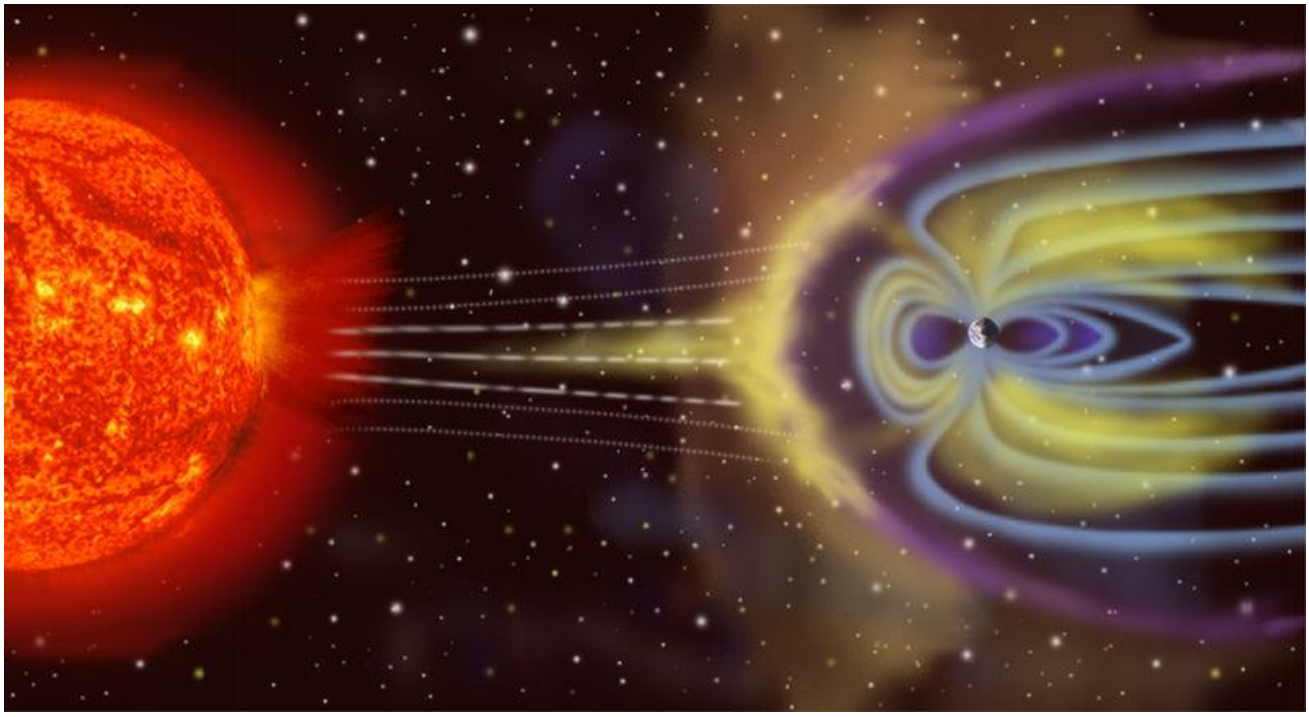


Рисунок 13. Схематическое изображение солнечно-земных связей (NASA). Продемонстрировано распространение коронального выброса массы и характерное обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли. Размеры не сохранены.

Наиболее поджатая подсолнечная точка находится от нас на расстоянии ~15 радиусов Земли, а хвост простирается за 200 радиусов Земли.

В районе полюсов есть области, куда входят линии замкнутого магнитного поля и очерчивают на поверхности Земли так называемый полярный овал - самое уязвимое место Земли, куда высыпаются и протоны солнечного ветра, и проникают космические лучи. Изучая статистику заболеваемости жителей высоких широт легко представить себе, какие последствия ожидают всех обитателей Земли, если магнитосферный «щит» ослабнет [13 – 15]. Ведь сейчас до Земли доходят лишь отголоски «солнечных бурь», что отражено на рис.13.

Несмотря на наличие собственных внутримагнитосферных процессов, магнитосфера постоянно «дышит» в такт изменениям в солнечном ветре, поскольку положение её границы зависит от баланса давлений: магнитного поля внутри и солнечного ветра снаружи. Соответственно, существует значительная часть вариаций геомагнитного поля, обусловленных состоянием межпланетной среды.

Наиболее ярким примером взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, разумеется, является геомагнитная буря. Первая фаза магнитной бури - поджатие магнитосферы и соответственное увеличение магнитного поля, обусловливается приходом области сжатия в солнечном ветре (это либо ударная волна корональных выбросов, либо уплотнение перед другими

© 2015, LLC Science and Innovations, Saratov, Russia

типами потоков). Затем при благоприятном направлении межпланетного магнитного поля (к югу) происходит пересоединение магнитных линий в лобовой точке магнитосферы и, что более важно - в хвосте, где накоплена большая часть энергии магнитосферы. В результате взрывообразного процесса пересоединения происходит выброс энергии, глобальная перестройка токовых систем и усиление вариаций геомагнитного поля всех типов. Магнитное поле в главной фазе магнитной бури падает, а изменение амплитуды геомагнитного поля на средних широтах может достигать более 300 нТ против 10-30 нТ нормальных суточных вариаций в спокойные и слабовозмущенные дни.

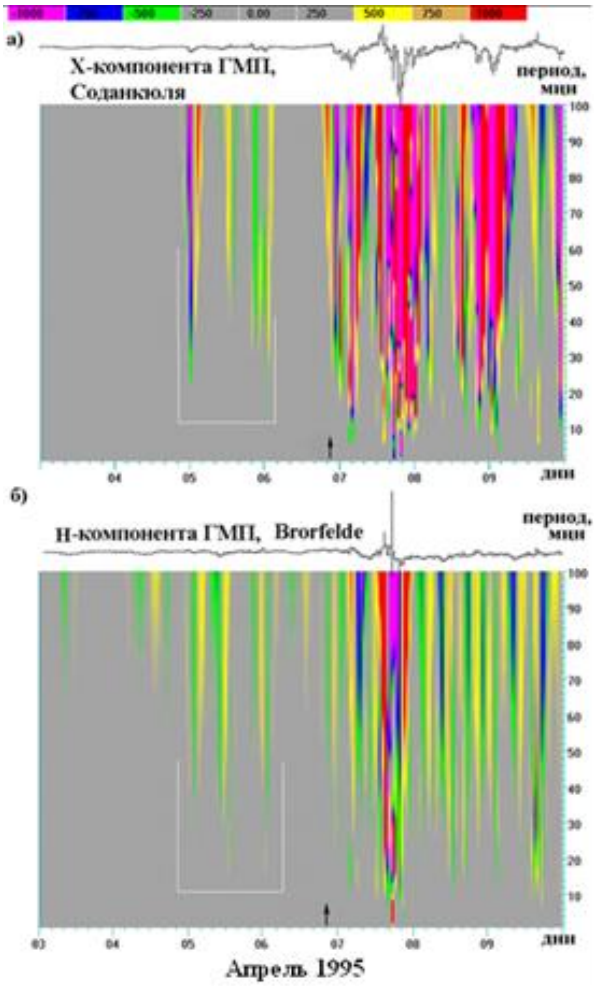


Рисунок 14. Пример протекания магнитной бури по данным станций Sodankyla (Финляндия) и Brorfeld (Дания). Вейвлет-анализ данных геомагнитного поля демонстрирует усиление вариаций ULF-диапазона после начала магнитной бури (указано стрелкой). Также наблюдаются предбуревые вариации, связанные с изменениями параметров солнечного ветра [рисунок по материалам О. В. Хабаровой и Е. А. Руденчика, 2003]

В это же время на высоких широтах вариации амплитуды могут быть на порядок больше. После достижения максимальной интенсивности бури, определяемой интенсивностью компоненты межпланетного магнитного поля вертикальной к плоскости эклиптики, начинается фаза восстановления. В результате буря в записях магнитометров выглядит как бухтообразное возмущение или последовательность таких возмущений (см. рис.14). Следует отметить, что усиление вариаций геомагнитного поля в биоэффективном диапазоне частот зачастую наблюдается не только после, но и до начала магнитных бурь [16], [17].

Трудность анализа последствий нестационарной солнечной активности состоит в том, что при крупных гелиофизических возмущениях почти все геофизические поля среды обитания изменяются почти одновременно. Ведь магнитная буря - это не только скачок магнитного поля и характерная форма возмущения, но и:

- усиление или ослабление геомагнитных пульсаций в широком диапазоне частот;
- изменение атмосферного электрического поля;
- нарушение установившегося режима циркуляции нижней атмосферы на средних широтах;
- усиление акустических шумов инфразвукового диапазона;
- изменение уровня напряженности электромагнитного фона в диапазоне низких и сверхнизких частот;
- возрастание радиоактивности атмосферы.

Из вышесказанного следует, что реакция современных биосистем (как единственно доступных нам объектов для изучения динамических процессов адаптации к нестационарным солнечным процессам), выработана в процессе длительной многомиллиардной эволюции при существенно отличающихся условиях исторической динамики Солнца и обусловлена целой совокупностью внешних факторов. Из них очень сложно выделить одного-единственного действующего агента, сыгравшего основную роль в зарождении и формировании жизни на Земле. Поэтому при рассмотрении факторов, которые могли бы оказать существенное влияние на процессы и время формирования жизни в солнечной системе, необходимо последовательно рассмотреть:

1. Процессы, протекавшие непосредственно в молодом Солнце.
2. Процессы, происходившие в это время в гелиосфере.
3. Процессы взаимодействия солнечного вещества и излучения с магнитосферой ранней Земли и ближайших планет.
4. Процессы взаимодействия гелиосферы с галактическим окружением.

О возможных отличиях описанных процессов на Солнце в современную эпоху и в период формирования биосферы Земли (в эпоху раннего Солнца) и пойдет речь ниже.

Оценка возможного времени возникновения жизни на земле, исходя из динамики древнего солнца

Как говорилось выше, условно можно выделить три основных состояния Солнца – совсем молодого с возрастом 1 – 10 млн. лет, Солнца возрастом около 1 млрд. лет и современного центрального светила нашей планетной системы. Молодое Солнце (возрастом до 1 млрд. лет), вероятно, имело период вращения вокруг своей оси около 10 дней. В ту эпоху активность Солнца была более высокой, чем сейчас, но менее регулярной. Затем установились циклы, но их амплитуды менялись: последовательности высоких циклов сменялись эпохами низкой активности типа Маундеровского минимума. Электромагнитное излучение Солнца на этих этапах эволюции в оптическом диапазоне менялось незначительно, однако в мягком рентгеновском диапазоне 0.15 – 4 кэВ (короче 90А) отношение рентгеновской светимости молодого Солнца к его полной (болометрической) светимости было в 1000 раз больше, чем в обычный максимум солнечной активности в современную эпоху.

Поскольку жизнь на Земле связана со сложными молекулами на основе углерода, то наиболее важными являются оценки изменения излучения в диапазоне короче 350А (см., например, [18] статью). В этом диапазоне находятся мощная резонансная линия ионизованного гелия (He II) 304А и многочисленные слабые линии высокоионизованных атомов, формирующиеся в солнечной короне. В настоящее время общее излучение в этом диапазоне меняется в течение 11-летнего цикла активности в 5 – 7 раз, а во время вспышек - на 2-3 порядка. Наша оценка показывает, что общее излучение молодого Солнца (возрастом 1 млрд. лет) в области 200 – 350 А было постоянно выше современного в 10 – 30 раз.

Корпускулярное излучение Солнца в эпоху его молодости и в настоящее время, по-видимому, отличалось столь же существенно, как нынешнее и историческое солнечное излучение в рентгеновском диапазоне. Общая потеря массы современного Солнца (количество вещества, уносимого солнечным ветром) характеризуется величиной, близкой к 4.4×1012 г/с, и прямо пропорциональна мощности, излучаемой Солнцем. При учете оцененной выше мощности излучения молодого Солнца делаем вывод, что поток вещества тогда был в 30 раз больше, чем сейчас. По-видимому, то же относится и к интенсивности солнечных космических лучей.

Легко догадаться, что все процессы в солнечном ветре, а также все вышеописанные солнечно-земные связи в прошлом были много интенсивнее нынешних. Кроме того, следует ожидать, что 4-3.5 млрд. лет тому назад во вспышечной активности Солнца доминировали не импульсные явления (как в настоящее время), а более длительные события. И в момент крупных вспышек мощность корпускулярного излучения древнего Солнца могла превосходить современный уровень во много раз.

Первичная атмосфера Земли, не обогащённая кислородом, была столь бедна и тонка, что при современных или меньших размерах магнитосферы Земли данные виды излучения могли быть существенными поражающими факторами, препятствующими процессам зарождения жизни на Земле. Сочетание более сильного потока солнечного ветра (на 2 порядка больше современного по плотности и более чем в 2 раза - по скорости) с корональными выбросами массы должно было приводить к сжатию земной магнитосферы и эрозии (потери) атмосферы под воздействием потоков солнечной плазмы

Поскольку толщина и состав атмосферы играют большую роль в экранировании от первичных КЛ, то поток КЛ на поверхности ранней Земли практически должен был определяться балансом лишь внешних факторов «поток КЛ вне солнечной системы - солнечная активность - напряженность магнитного поля Земли». Поскольку первоначально ядро Земли было целиком жидким, то собственная магнитосфера у неё отсутствовала довольно длительное время. По последним данным из [19], магнитное поле Земли вполовину слабее нынешнего появилось 3.45 млрд. лет назад. До этого фактор геомагнитной защиты нашей планеты можно сбросить со счетов. Таким образом, до возраста Земли ~1 млрд. лет поток КЛ был постоянно усилен: при понижении солнечной активности до поверхности доходили ГКЛ, а при повышении солнечной активности Земля облучалась СКЛ. Состояние космического пространства в этот период не способствовало возникновению жизни.

Между тем, без жестких воздействий нашего молодого светила первичный климат на Земле теоретически мог бы позволить жизни если не самозародиться, то хотя бы появиться в результате панспермии (занесения бактерий с метеоритами и астероидами). Считается, что климат Земли в эпоху молодого Солнца был теплым и влажным [20]. Вопрос - почему? Здесь перед нами встаёт проблема «faint early Sun» - парадокс слабого молодого Солнца. Дело в том, что, следуя стандартной модели, около 3.8 миллиардов лет назад болометрическая светимость молодого Солнца должна была быть на 20-30% ниже, чем сегодня [21-22] (см. Рис. 15 из [21]).

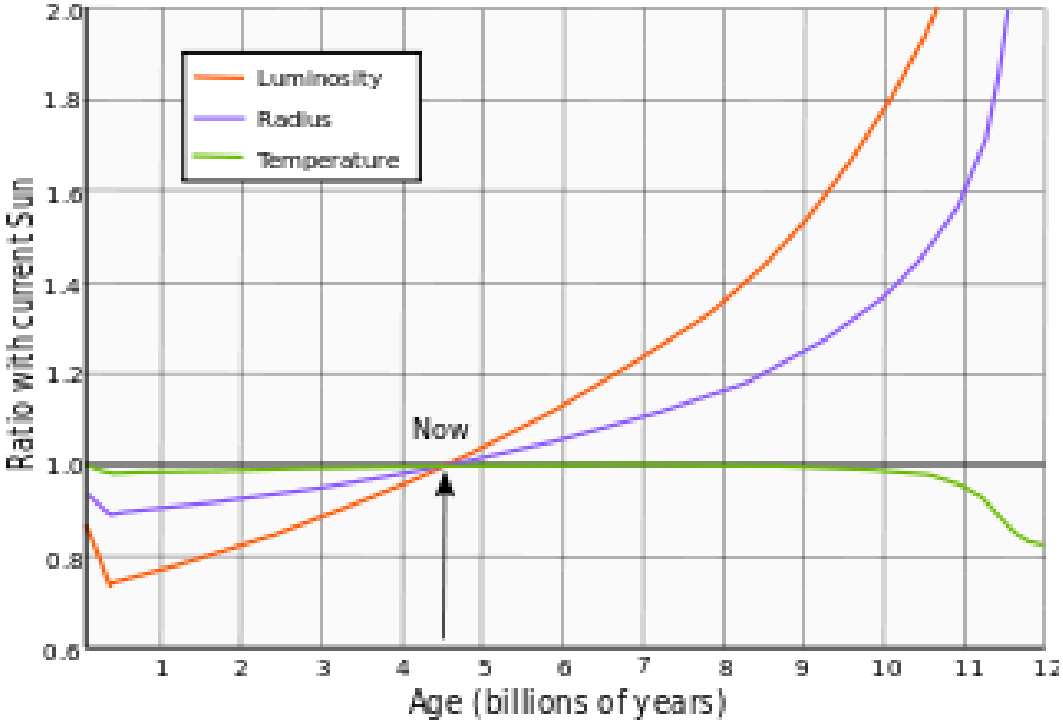


Рисунок 15. Эволюция солнечной светимости, радиуса и эффективной температуры по сравнению с современным уровнем. [Ribas, 2010].

Затем светимость Солнца постепенно росла до современного уровня, но в то время минимум светимости должен был привести к вымерзанию воды на Земле, что не подтверждается геологическими данными.

Причин этого может быть достаточно много. Каждый год появляются новые статьи, содержащие вычисления и идеи, проверить которые вряд ли когда-нибудь представится возможным. С одной стороны, большую роль мог играть нагрев молодой Земли радиоактивными элементами [23]. С другой - есть работы, утверждающие, что оценки светимости должны были проводиться не по стандартной модели, а по модели пульсаров - “pulsar centered solar model” [20]. Тогда получается, что светимость была не ниже, а выше на 1-4%.

Между тем, основной причиной обычно называется парниковый эффект. Считается, что первичная атмосфера Земли, определяемая вулканической деятельностью, была тонкой, но во много раз более плотной, чем сейчас. В результате создавалась необходимая прослойка, не дающая теплу уходить вверх [23]. На этом общем предположении базируются несколько теорий молодой Земли, но основная проблема состоит в том, что первичный состав земной атмосферы достоверно неизвестен.

Со своей стороны мы можем предположить, что дополнительным фактором, нагревающим Землю, были солнечные вспышки. В эпоху молодого Солнца, во время несравнимо более мощных, чем в настоящее время, вспышек, повышенный уровень ультрафиолетового и рентгеновского излучения на поверхности молодой Земли мог являться химическим катализатором и приводить к интенсификации высвобождения парниковых газов.

На ранней стадии эволюции все проявления солнечной активности были значительно более сильными, и поэтому зависимость, как состояния атмосферы, так и биологических объектов, от солнечной активности была гораздо значительнее. Несмотря на возможный вклад в развитие парникового эффекта, теоретически благоприятного для зарождения первичных жизненных форм, Солнце в этот период являлось киллером всего живого не только на Земле, но и на других небесных телах. Оценки показывают, что для Венеры и Марса негативные последствия бурной жизни молодого Солнца были гораздо более существенными.

Молодое солнце и условия развития жизни на планетах

Итак, естественной защитой биосистем от потока солнечных частиц является магнитосфера Земли. Появление магнитосферы - ключевой момент не только для защиты от излучения, но и для удержания и обогащения земной атмосферы, которая до этого сносилась солнечным ветром. Всё это в совокупности, по-видимому, и дало толчок для развития жизненных форм, которые до этого не имели шанса выжить в чрезвычайно жестких условиях внешней среды. Действительно, в период около 4-3.5 млрд. лет назад Земля, астероиды между Землей и Марсом (и, возможно, сам Марс) оказываются единственными кандидатами для места зарождения или панспермического развития жизни в силу баланса космических факторов. Что касается астероидов, то они не обладают ни магнитным полем, ни атмосферой и вряд ли подходят на роль кандидатов на места зарождения жизни. Но, как показывают современные исследования, «зерна жизни» (аминокислоты и даже бактерии) выживают и в условиях, характерных для астероидов. Поэтому астероиды и метеориты могли быть источниками панспермического варианта зарождения биосферы. Однако, чтобы жизнь не только зародилась, но и развилась, «семена» должны попасть в благоприятную почву. Между тем, на

планетах, более близких к Солнцу, чем Земля, возникающая жизнь «выжигалась» потоком мощнейшего рентгеновского и корпускулярного излучения раннего Солнца, а более дальние планеты не получали достаточного количества тепла для существования воды в жидкой фазе. Условия на Земле изначально были также неблагоприятны для развития жизни. Покажем, что только после перехода Солнца к более спокойной фазе и после появления магнитосферы возникли условия, при которых жизнь могла зародиться или развиться на Земле.

Воздействие раннего Солнца на атмосферы планет

Планеты после своего возникновения могут превратиться в «водные миры» с массивными водородно-кислородными атмосферами и с высоким содержанием CO2, что теоретически благоприятно для развития жизни. Главным кандидатом на роль инкубатора жизни, кроме Земли, является Марс. Между тем, как показано в [24], путём трехмерного МГД-моделирования взаимодействия солнечного ветра с ионосферой Марса, если предположить отсутствие у Марса в этот период собственного магнитного поля, то в условиях экстремального солнечного ветра и крайнего ультрафиолетового излучения Солнца Марс мог утратить количество воды, эквивалентное глобальному океану глубиной от 20 до 80 метров. Таким образом, предположение о Марсе - прародителе жизни может оставаться в силе только, если будет доказано, что Марс имел собственное магнитное поле и, соответственно, магнитосферу.

Как мы убедились, характеристики атмосферы играют огромную роль для потенциальной возможности зарождения жизни. Если в атмосфере планеты земного типа образуется высокое относительное содержание азота N2 слишком рано в ходе её эволюции, то такая азотная атмосфера может быть полностью утрачена планетой. Для ранней земной атмосферы эрозия под влиянием солнечного ветра могла быть очень существенной в предположении, что химический состав атмосферы Земли соответствовал современному составу с преобладающим содержанием азота. Такая атмосфера теряется под воздействием экстремально интенсивного потока плазмы солнечного ветра в течение первых нескольких миллионов лет после её формирования [25].

Между тем, достоверной информации о составе первичной атмосферы Земли нет. Есть только модели, основывающиеся на том принципе, что в первый миллиард лет жизни нашей планеты атмосфера определялась газообразованием вследствие вулканической деятельности. В результате моделирований гипотетические составы первичной атмосферы отличаются в разы, а то и на порядок. Часть исследователей считает, что преобладал водород (http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth); другие предполагают доминирование азота [26], а третьи - углекислого газа [23] (см. обсуждение на http://www.amnh.org/learn/pd/earth/pdf/evolution_earth_atmosphere. pdf).

Таким образом, изучение возможного состава атмосферы Земли на ранних стадиях её развития - очень важная часть анализа гипотетических условий, способствовавших развитию жизни. Кроме того, влияние Солнца на физические и химические характеристики атмосферы было столь значительным, что от вариаций его деятельности зависело очень многое на Земле, в том числе и появление биосферы.

Когда Солнце позволило жизни зародиться?

Анализ пикового потока излучения и спектра экстремальной солнечной вспышки класса X17.2 в октябре–ноябре 2003 г., а также его сравнение со спектрами излучения более молодых звезд – солнечных аналогов, показывает, что излучение вспышки в максимуме соответствует излучению Солнца или гипотетической звезды – аналога Солнца, имеющей приблизительный возраст 2.3 млрд. лет. Это означает, что поток крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) в пике вспышки превышает его среднее значение для современного Солнца примерно в 2.5 раза. Это может привести к значительному нагреву экзосферы вплоть до ~ 1950 К [27].

Итак, обнаруживаются два пути эволюции активности солнечного типа на временном интервале, сопоставимом с миллиардом лет жизни звезды. Первый путь характерен для тех звёзд, у которых в настоящую эпоху цикличность носит регулярный характер. На возможность реализации другого пути указывает открытое нами [28] расхождение особенностей дифференциального вращения Солнца и других звёзд с хорошо выраженными циклами. А именно: свойства дифференциального вращения Солнца оказались более близкими к звёздам с менее регулярной активностью (типичной для более молодых звёзд), чем к звездам с установившимися циклами.

Исследования ИЗМИРАН в 2010 г. также указывают на отличие эволюции активности Солнца от поведения других звёзд, у которых развитие динамо процесса завершается выходом на асимптотический режим хорошо выраженного цикла. На некоторой фазе развития активности доминирование крупномасштабного поля нарушается возрастающим влиянием локальных полей и этот процесс переходит на жесткий колебательный режим обмена энергией между полями этих масштабов. При этом формируется цикл, период которого неизменен на большом временном интервале.

Возможно, сам факт возникновения жизни 3.5 – 4 млрд. лет назад (не раньше и не позже) определился именно тем моментом, когда был достигнут баланс между скоростями возникновения и разрушения новых органических структур под воздействием космофизических излучений различного типа. До этого времени даже при наличии благоприятных температурных, атмосферных и литосферных условий вновь сформировавшаяся (или занесенная с метеоритами) жизнь практически сразу разрушалась очередным импульсным потоком внешнего излучения, не успев начать процесс эволюции. Вполне вероятно, что установление такого баланса явилось не только следствием появления магнитосферы, но и было связано с переходом Солнца к более упорядоченному типу активности.

© 2015, LLC Science and Innovations, Saratov, Russia

Роль космических лучей в эволюции биосферы

Биосфера Земли зародилась, развивалась и продолжает эволюцию в присутствии постоянно действующего экологического фактора - радиационного фона ионизирующих излучений. Этот фон создаётся естественной радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами. Изучение разнообразных космофизических факторов (в частности, вариаций КЛ) открывает возможности для получения новой информации о процессах эволюционной адаптации биосистем в целом. Для примера отметим, что бурное событие в истории возникновения новых форм жизни (так называемый «Кембрийский взрыв» около 580-500 млн. лет назад), по-видимому, совпало по времени со значительным изменением интенсивности ГКЛ (см. Рисунок 16).

Эти данные были получены А.К. Лаврухиной в 1969 г. [29] путем измерения содержания изотопов, генерированных космическими лучами в железных метеоритах, и подтверждены в работе 1990 г. [30].

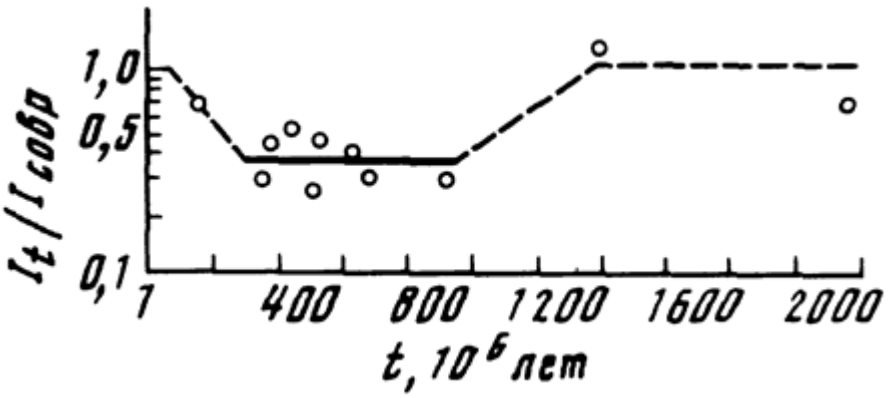


Рисунок 16. Возможные изменения интенсивности ГКЛ в Солнечной системе за последние ~ 2 млрд. лет по данным о радиоактивности 40К в железных метеоритах и металлических фазах хондритов с разным радиационным возрастом (Лаврухина, 1969; Лаврухина и Устинова, 1990).

Из Рисунка 16 следует, что в интервале от 900 до 400 млн. лет назад поток ГКЛ мог быть понижен в несколько раз по сравнению с нынешним уровнем. Подобный эффект мог наблюдаться при условии, что интенсивность «древних» потоков солнечного ветра более чем в 3-5 раз превышала современный уровень в максимуме самых мощных циклов СА в XX-м столетии. При таких интенсивностях вынесенные из Солнца потоки замагниченной плазмы могли бы усиленно «выметать» космические лучи за пределы пояса астероидов (родительского источника для большинства метеоритов) и тем самым понизить поток ГКЛ внутри Солнечной системы (в частности, на орбите Земли) до нужной величины.

Однако современная теория солнечного динамо не может дать точную оценку максимальной величины солнечной активности, которая бы устойчиво высоко повторялась из цикла в цикл на протяжении нескольких сотен миллионов лет. Рассмотрение возможности такой ситуации в рамках существующей модели формирования солнечной активности путем взаимодействия магнитных полей различного типа – это отдельная нетривиальная задача для теории солнечного динамо.

Более поздние исследования вариаций ГКЛ по метеоритным данным вынуждают усомниться в достоверности кривой, приведенной на рис.16. В частности, нет уверенности в том, что ранее 900 миллионов лет назад (правая часть рисунка) поток ГКЛ был таким же, как и в настоящее время. Имеются данные о том, что погрешность в оценках потока ГКЛ по метеоритным данным довольно велика (от ~ 0.3 до ~1.5). Вместе с тем, по некоторым оценкам, ожидаемые изменения потока ГКЛ в прошлом (до 1 млрд. лет назад) могли достигать от 25% до 135%. Во всяком случае, можно с некоторой долей уверенности утверждать, что в период 900-400 миллионов лет назад поток ГКЛ, по-видимому, был в 2-3 раза ниже, чем сейчас. Этот ставит перед современной теорией динамо сложную задачу. Солнечная активность сегодня выражается в единицах числа солнечных пятен и в максимуме 11-летнего цикла меняется в пределах 50-200 единиц (среднемесячные значения). В среднем за последние 200 лет уровень солнечной активности в этих единицах составляет ~50. В прошлом были периоды, когда в течение 70 лет средний уровень активности падал до нескольких единиц. Однако, для объяснения указанных выше эффектов необходимо длительное (в течение сотен миллионов лет) увеличение солнечной активности в 2-3 раза, то есть до среднего значения 100-150 единиц. На сегодня работ, доказывающих возможность такого мощного увеличения нет, и это представляет весьма интересную задачу для теоретиков.

Кроме того, отдельным является вопрос, какой поток ГКЛ следует считать нормальным – тот, который был в прошлом, или наблюдаемый в настоящее время. Однако, как показано в п.1.3.2, сама возможность существенных вариаций потока ГКЛ в прошлом не подлежит сомнению. Отдельную проблему представляет оценка частоты гигантских вспышек на Солнце в современную эпоху и в далёком прошлом, а также оценка частоты вспышек Сверхновых звёзд.

В работе двухлетней давности [31] подсчитана частота возникновения вспышек Сверхновых (рис.17) и проведено её сравнение с биоразнообразием морских обитателей того времени.

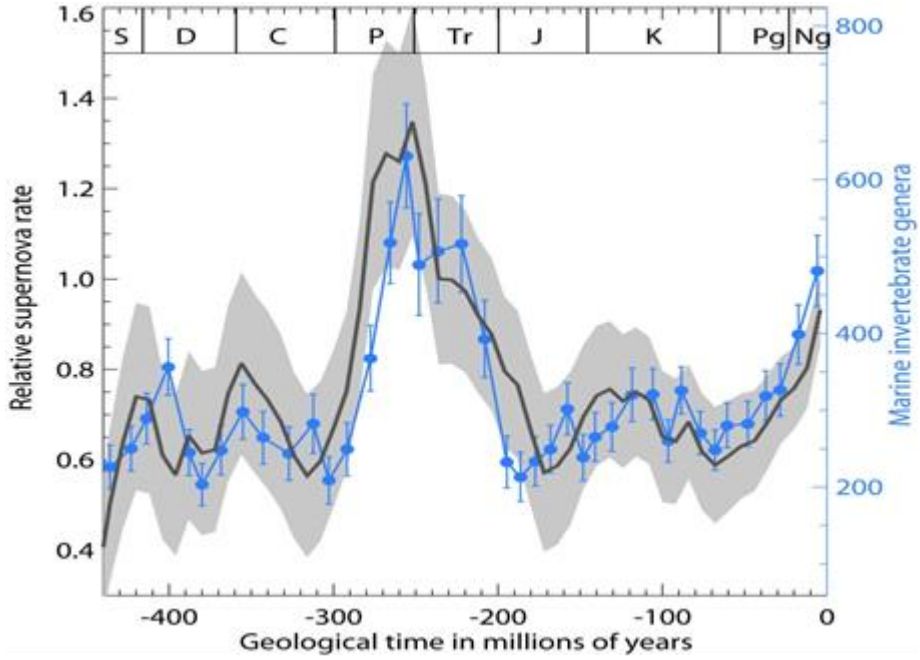


Рисунок 17. Относительная частота вспышек Сверхновых в сравнении с количеством родов беспозвоночных, обнаруженных в морских отложениях (Svensmark, 2012).

На рис.17 сплошной черной кривой показана оцененная автором относительная частота вспышек Сверхновых в пересекаемых Солнечной системой рукавах Галактики. Кривая с точками иллюстрирует количество родов морских беспозвоночных в отложениях с вычетом влияния вариаций уровня океана на смертность живых организмов. Удивительное совпадение не может не заставить задуматься.

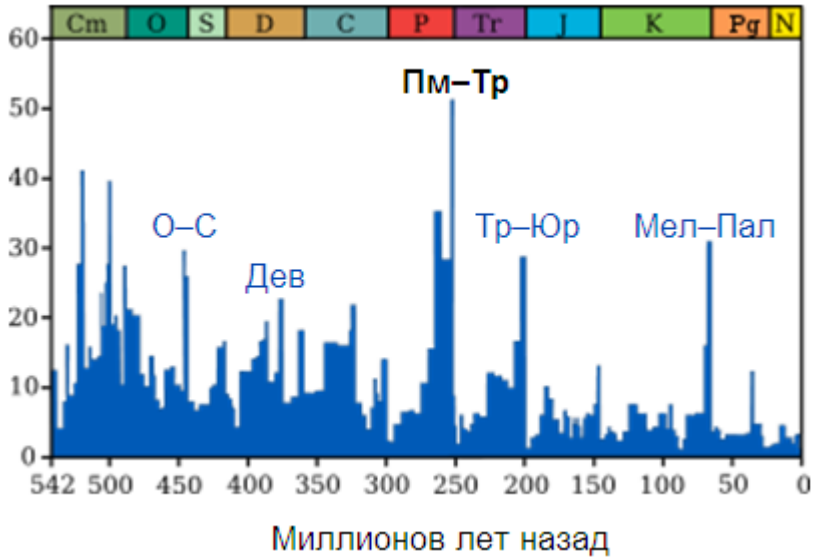


Рисунок 18. Массовые вымирания морской фауны на Земле (Sepkoski, 2002).

Здесь присутствует яркий пик одного из пяти массовых вымираний живых существ на планете - на границе Пермского и Триасового (П-Тр) периодов. Для сравнения на рис.18 дана полная картина вымираний в геологическую эпоху [32]. Рассматриваемый здесь пик (П-Тр) - самый значительный.

Конечно, расчеты [31] можно подвергнуть сомнению. В частности, поражает точность расчетов частоты вспышек Сверхновых за столь удаленный исторический период. Кроме того, при сравнении рисунков 17 и 18 обнаруживается отсутствие на рис.17 пика вымираний на границе Триаса и Юры ~200 млн. лет назад. Очевидно, коррекция на уровень океана, сделанная автором, достаточно сильно изменяет оригинальный ряд данных и подлежит проверке.

© 2015, LLC Science and Innovations, Saratov, Russia

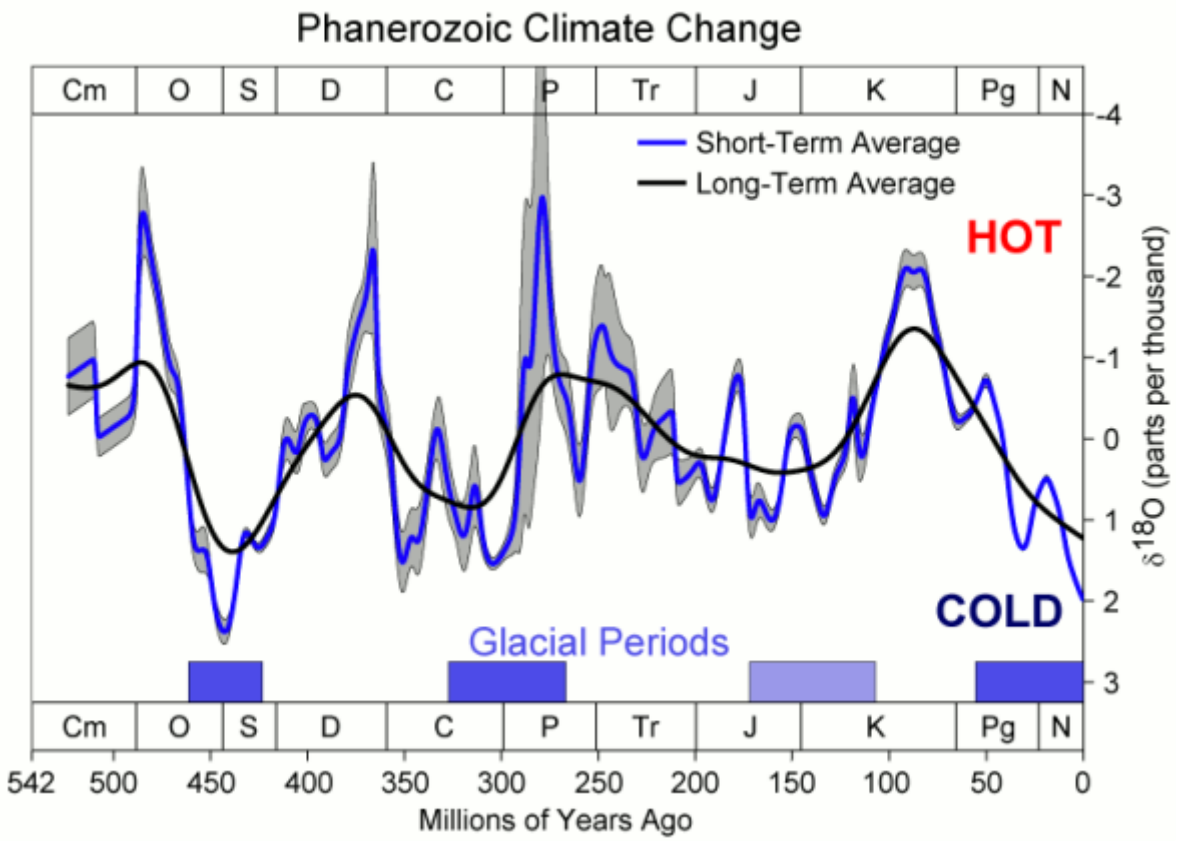


Рисунок 19. Вариации изотопа кислорода 18 и климат палеозоя (Veizer et al., 1999).

С другой стороны, имеются независимые «климатические» данные, полученные [33], которые указывают на вариацию содержания изотопа кислорода на большой временной шкале (рис.19). Все максимумы на этой кривой согласуются с кривой Свенсмарка.

Заключение

Общая современная теория эволюции звезд развита довольно хорошо. Она предсказывает, что звезды главной последовательности (включая Солнце) после бурного раннего периода выходят на стационарный режим. В этом режиме интегральный поток солнечного излучения фактически не меняется. Однако когда встают конкретные вопросы об особенностях генерации магнитного поля Солнца, картина становится не такой ясной.

Строго говоря, современные механизмы динамо неуверенно предсказывают даже высоту предстоящего 11-летнего цикла солнечной активности. Тем более, они не могут исключить длительных периодов, когда солнечная активность была значительно выше или значительно ниже современного уровня. При этом могли бы меняться как эффективная светимость Солнца (известно, что даже сейчас в максимуме цикла она на 0.1% выше, чем в минимуме), так и непосредственно геоэффективные факторы. Современная теория вспышек не может отрицать возможность существования в историческое время солнечных вспышек на 3-4 порядка более мощных, чем сегодня. Во всяком случае, на звездах типа Солнца такие события происходят регулярно. Важно не только проверить по палеомагнитным данным были ли такие события в прошлом, но и оценить их возможное влияние на биосферу.

Солнечная активность – это сложное многофакторное явление. Традиционная схема поиска связи изменений в биосфере, например, с числами солнечных пятен устарела. Различные факторы солнечной активности могут по-разному влиять на биосферу. Кроме того, эта связь может сильно меняться на разных временных масштабах. В частности, роль отдельных вспышек, вероятно, очень важна на коротких интервалах времени, а на больших интервалах можно ожидать гораздо большего влияния глобальных полей и их вековой эволюции.

В связи с вышесказанным можно сформулировать следующие новые направления исследований эволюционных аспектов биотропного воздействия космических факторов:

1. Изучение (на современном клеточном материале) характерных времен возникновения реакции и определения порога разрушения эталонных клеточных структур для воссоздания (моделирования) биотропных параметров активности древнего Солнца.

2. Изучение современного отклика биосистем на космофизические факторы как атавистической реакции на изменение условий среды обитания [34- 42].

3. Построение теоретических моделей с учетом возможных интенсивностей излучений, воздействовавших на биосферу в прошлом [43].

4. Изучение пространственно-временных масштабов и физико-химических условий формирования жизни на Земле путем сопоставления полученных астрофизических космо-геофизических результатов с геохимическими и палеонтологическими данными для верификации как современной модели солнечного динамо, так и имеющихся моделей эволюции биосферы [43 -47].

Список литературы

1. Brandenburg, A.: 2003, ``Computational aspects of astrophysical MHD and turbulence,'' in Advances in nonlinear dynamos (The Fluid Mechanics of Astrophysics and Geophysics, Vol. 9), ed. A. Ferriz-Mas & M. Núñez, Taylor & Francis, London and New York, pp. 269-344.
2. Bohm-Vitense, 2006.
3. Giardino G., Pillitteri I., Favata F., et al. The X-ray luminosity of solar-mass stars in the intermediate age open cluster NGC 752. Astronomy and Astrophysics; 490 (1): 113-123.
4. Lammer H., Eybl., Kislyakova K G., et al. UV transit observations of EUV-heated expanded thermospheres of Earth-like exoplanets around M-stars: testing atmosphere evolution scenarios. // Astrophys. Space Sci., 2011, 335, (1): 39-50, doi: 10.1007/s10509-011-0646-5.
5. Ribas I., Guinan E. F., Güdel M. et al. Evolution of the Solar Activity over Time and Effects on Planetary Atmospheres. I. High-Energy Irradiances (1-1700 Å) The Astrophysical Journal; 622, (1): 680-694.
6. Brandenburg A., Subramanian K / Astrophysical magnetic fields and nonlinear dynamo theory. PhysRep, 417, 1--209, 2005.
7. Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena, 'Universal Heliophysical Processes'Proceedings IAU Symposium No. 257, 2008.
8. Lal D., Jull A.J.T, D. Pollard, et al. (2005). "Evidence for large century time-scale changes in solar activity in the past 32 Kyr, based on in-situ cosmogenic 14C in ice at Summit, Greenland". Earth and Planetary Science Letters 234 (3–4): 335–249. DOI:10.1016/j.epsl.2005.02.011
9. Schwadron N. A., Boyd A. J, Kozarev K., et al. (2010), Galactic cosmic ray radiation hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycles 23 and 24, Space Weather, 8, S00E04, doi:10.1029/2010SW000567.
10. Rohde1 R. A., Muller R. A., Cycles in fossil diversity Nature 434, 208-210, 2005
11. Medvedev M.M., A.L. Melott (2007), Do extragalactic cosmic rays induce cycles in fossil diversity? Astrophys. (664): 879-889.
12. Rao M. (1998), Extensive Air Showers, World Scientific, p. 10, ISBN 9789810228880
13. Белишева Н.К., Конрадов С.А. Значение вариаций геомагнитного поля для функционального состояния организма человека в высоких широтах // Геофизические процессы и биосфера. 2005. 4 (1/2): 44-52.
14. Белишева Н.К.,. Кужевский Б.М,. Сигаева Е.А и др. Модуляция функционального состояния крови вариациями интенсивности нейтронов у поверхности Земли // ДАН. – 2006; 407 (5): 687-691.
15. Кривощеков А.П., Комплексное социально-гигиеническое исследование по охране здоровья работающихгазодобывающей промышленности в условиях Крайнего Севера Западной Сибири. Дисс. на соиск. степени к.м.н. 04201007824, Тюмень, 2010.
16. Хабарова О.В., Руденчик Е.А. Об особенностях изменения осцилляторного режима плотности солнечного ветра и магнитного поля Земли перед магнитными бурями - результаты вэйвлет-анализа. Вестник отделения Наук о Земле РАН, 2003; (1):21.
17. Khabarova O., Dimitrova S. On the nature of people's reaction to space weather and meteorological weather changes. Sun and Geosphere, 2009; 4(2):60-71.
18. Cunz M., Gurdemir L., Guinan E. F., et al.. 2009, Astrobiology in the Environments of Main-Sequence Stars: Effects of Photospheric Radiation Bioastronomy 2007: Molecules, Microbes and Extraterrestrial Life ASP Conference Series, Vol. 420, proceedings of a workshop held 16-20 July 2007 in San Juan, Puerto Rico. Edited by Karen J. Meech, Jaqueline V. Keane, Michael J. Mumma, Janet L. Siefert, and Dan J. Werthimer. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009, p.253.
19. 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, 327, 1238-1240, 2010.
20. K. Michaelian and O . Manuel. (2011). "Origin and Evolution of Life Constraints on the Solar Model", Journal of Modern Physics, 2(6): 587-594.
21. Ribas I., (February 2010), "The Sun and stars as the primary energy input in planetary atmospheres", Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 264: 3 – 18, Bibcode 2010IAUS..264....3R, DOI:10.1017/S1743921309992298
22. Guinan E. F., Scott G. E. The Sun in Time: Age, Rotation, and Magnetic Activity of the Sun and Solar-type Stars and Eects on Hosted Planets The Ages of Stars Proceedings IAU Symposium 2009; 258.
23. Hobbs, 2000; http://www.amnh.org/learn/pd/earth/pdf/evolution_earth_atmosphere.
24. Terada N., Kulikov Yu.N, Lammer H., et al. (2009) Atmosphere and Water Loss from Early Mars Under Extreme Solar Wind and Extreme Ultraviolet Conditions. // Astrobiology, 2009, v. 9, No. 1, pp. 55–70. doi: 10.1089/ast.2008.0250
25. Lammer H., Kislyakova K.G., Odert P., et al. (2012) Pathways to Earth-like atmospheres: Extreme Ultraviolet (EUV) – powered escape of hydrogen-rich protoatmospheres. // Origine of Life & Evolution of Biospheres, 2012.
26. C. Goldblatt, A. J. Matthews, M. W. Claire, T. M. Lenton, A. J. Watson and K. J. Zahnle, Nitrogen as a resolution of the Faint Young Sun Paradox.Quart. J. Roy. Met. Soc.,135 (640): 619-633, doi:10.1002/qj.403.
27. Lammer H, Hanslmeier A, Schneider J, et al. Наблюдения, проекты и развитие исследований экзопланет и их родительских звезд: состояние проблемы. Астрономический вестник 2010, 44 (4): 314-335.

28. Katsova M.M., Livshits M.A., Soon W., et al. Differential rotation of some HK-Project stars and the butterfly diagrams. New Astronomy. V. 15 (2010) P.274–28129. Лаврухина. А.К. Новые данные о временных и пространственных вариациях космических лучей в Солнечной системе (по метеоритным данным). – Известия АН СССР, серия физическая, 1969; 23 (11):1870-1876.
29. Лаврухина. А.К. Новые данные о временных и пространственных вариациях космических лучей в Солнечной системе (по метеоритным данным). – Известия АН СССР, серия физическая, 1969; 23 (11): 1870-1876.
30. Лаврухина А.К., Устинова Г.К.. Метеориты – зонды вариаций космических лучей. – М., Наука, 1990. 262 с.
31. Svensmark H., Evidence of nearby supernovae affecting life on Earth. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012; 423(2):1234–1253. ftp://ftp2.space.dtu.dk/pub/Svensmark/MNRAS_Svensmark2012.
32. Sepkoski J., (2002) A Compendium of Fossil Marine Animal Genera (eds. Jablonski, D. & Foote, M.) Bull. Am. Paleontol. no. 363 (Paleontological Research Institution, Ithaca, NY).
33. Veizer J., Ala D., Azmy K., et al. (1999) 87Sr/86Sr, d13C and d18O evolution of Phanerozoic seawater. Chemical Geology 161: 59-88.
34. Владимирский Б. М.. Темурьянц Н. А, Мартынюк В. С.. Космическая погода и наша жизнь. Из-во «Век 2», 2004.
35. Коллективная монография « Биотропное воздействие космической погоды» под редакцией. Рагульской М. В, Санкт- Петербург, 2010. 330 с.
36. Гурфинкель Ю.И., Любимов В.В. Экранированная палата в клинике для защиты пациентов с ишемической болезнью сердца от воздействия геомагнитных возмущений// Мед. физика. – 2004; 3(23): 34-39.
37. Бреус Т.К., Баевский Р.М., Фунтова И.И и др. Влияние возмущений геомагнитного поля на реакцию адаптивного стресса у космонавтов // Космические исследования. – 2008; 46 (4): 378-383.
38. Белишева Н.К., Гак Е.З. Значение вариаций космических лучей для функционирования живых систем// Сб.научных докл. VII Межд.конф. "Экология и Развитие Северо-Запада России» 2-7 августа 2002 г., Санкт-Петербург. С. 8-129.
39. Рагульская М. В., Хабарова О. В. // Влияние солнечных возмущений на человеческий организм. Биомедицинская радиоэлектроника, 2001; (2): 5-15.
40. Хорсева Н. И., Григорьев П. Е. с соавт. Глава 1 коллективной монографии «Космос и жизнь – единство и многообразие»// Симферополь, Из-во «Диайпи», 2010.
41. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь // Москва, Из-во «Мысль», 1976.
42. Чичкан Д.Н., Ткачев С.В. и др. .Агрегационные свойства крови после воздействия низкочастотных магнитных полей различного диапазона частот // Электромагнитные поля и здоровье человека. Сентябрь 1999, Москва, с. 75-76.
43. Рагульская М. В.,. Пипин В. В // Нелинейные динамические модели ЭКГ в задаче изучения воздействия космофизических факторов на сердце человека. Динамика сложных систем, 2010; 1 (1): 17-26.
44. Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и Солнечно-Земных Связей. - Под ред. М. И. Панасюка. - М.: Университетская книга, 2011; 174 с. - ISBN 978-5-91304-191-3.
45. Lammer H., Odert P., Leitzinger Maehara H., Shibayama T., Notsu Sh. et al. Superflares on solar-type stars doi:10.1038/nature11063, 2012.
46. Manchester W. B., Gombosi T. I., Roussev I., et al. (2004), Modeling a space weather event from the Sun to the Earth: CME generation and interplanetary propagation, J. Geophys. Res., 109, A02107, doi:10.1029/2003JA010150M., et al. Determining the mass loss limit for close-in exoplanets: What can we learn from transit observations?// Astron. and Astrophys. 2009: 506: 399–410. doi:10.1051/0004-6361/200911922
47. Maehara H., Shibayama T., Notsu Sh. et al. Superflares on solar-type stars doi:10.1038/nature11063, 2012.

Авторы:

Обридко В.Н. – д.ф.м.н, профессор, заведующий отделом солнечно-земных связей ФГБУН Институт земного магнетизма,ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Мирошниченко Л.И. – д.ф.-м.н., зав. сектором гелиоэкологии ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Рагульская М.В. – к.ф.-м.н., с.н.с., ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Руденчик Е.А. – к.ф.-м.н., вудущий научный сотрудник, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Хабарова О.В. – к.ф.-м.н., с.н.с., ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

Храмова Е.Г. – старший инженер, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространенности радиоволн им. Н.В. Пушкова