

КОСМОФИЗИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ЭПОХУ КЕМБРИЙСКОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО ВЗРЫВА

© 2014 Л.И. Мирошниченко, О.В. Хабарова

*Институт земного магнетизма и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН)
leonty@izmiran.ru*

По имеющимся литературным данным рассматривается космофизическая ситуация вблизи Земли в эпоху Кембрийского эволюционного взрыва. В частности, некоторые астрофизические данные указывают на то, что около 500 миллионов лет назад Солнце вошло в галактический рукав Персея с повышенной звездной населенностью, где и находилось в течение нескольких десятков миллионов лет. Согласно немногочисленным метеоритным данным, средний уровень интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) в этот период был значительно выше, чем в межрукавном пространстве, до вхождения Солнца в рукав Персея. В дальнейшем поток ГКЛ также изменялся в пределах 25–135 % при последующих пересечениях других галактических рукавов. Эти вариации определенным образом коррелировали с периодами глобальных потеплений и похолоданий (оледенений), но однозначного соответствия не обнаружено. К сожалению, точность определения потока ГКЛ по метеоритным данным колеблется в пределах от множителя 0.3 до 1.5. Для более определенных выводов нужны дополнительные данные и моделирование переноса ГКЛ с учетом их характерного времени жизни $\sim 10\div 100$ миллионов лет, учет вклада вспышек сверхновых и вероятности гигантских возрастных потоков солнечных космических лучей (СКЛ). Нельзя исключить также влияния геомагнитных инверсий, осцилляций положения Солнца в Галактике и других (пока неизвестных) факторов.

ВВЕДЕНИЕ

С момента возникновения жизни в истории развития органического мира Земли произошло несколько важнейших событий, определивших дальнейшую эволюцию биосферы. Среди них надо отметить, в первую очередь, появление эукариот и многоклеточных организмов. Около

500–600 млн. л. н. (Розанов, 1986) многоклеточные организмы впервые получают возможность строить скелет, и с тех пор органический мир Земли приобретает черты, все более сходные с современными. Этот переломный период получил название Кембрийского эволюционного взрыва. С точки зрения палеонтологии, Кембрийский взрыв – это внезапное (в геологическом масштабе времени) появление в раннекембрийских отложениях окаменелостей (около 540 млн. л. н.) представителей многих подразделений животного царства. При этом их окаменелости или окаменелости их предков в докембрийских отложениях начисто отсутствовали.

По мере накопления палеонтологических данных, как известно, предпринималось множество попыток объяснить причины подобного «взрывного» развития, а сама интерпретация Кембрийского взрыва неоднократно менялась. Среди «внешних» (небиологических) причин взрыва до сих пор рассматривались четыре основных гипотезы, опирающиеся на концепцию изменения окружающей среды: 1) рост концентрации кислорода («кислородная катастрофа»); 2) глобальное оледенение; 3) флуктуации изотопного состава углерода (глобальный «парниковый эффект»); 4) внешнее (метеоритное, астероидное) воздействие.

Насколько нам известно, ни одна из этих непосредственных причин сама по себе не может объяснить всю совокупность данных о Кембрийском взрыве. С другой стороны, некоторые из гипотез, в свою очередь, настоятельно требуют привлечения внешних факторов (например, оледенение Земли из-за вариаций активности Солнца или прохождения Солнечной системы через межзвездное пылевое облако). Поэтому представляется целесообразным рассмотреть некоторые астрофизические аспекты данной проблемы, которые редко обсуждаются в литературе с позиций современного знания о структуре Галактики и динамике звезд, о галактических космических лучах (ГКЛ), об активности Солнца и других внеземных факторах.

О космофизических (астрофизических) условиях, в которых произошел Кембрийский взрыв, пойдет речь в этой краткой заметке.

ЧТО НАДО УЧИТЫВАТЬ?

Если возраст Земли (4.8×10^9 лет) принять за сутки, то жизнь на Земле существует всего 17.5 часа, млекопитающие – 30 минут, а человек – только последние 18 секунд. Кембрийский взрыв по этой шкале случился 2.7 часа назад, а возраст ГКЛ, которые приходят к Земле и регистрируются в настоящее время, не превышает 30 мин. Эту специфическую временную шкалу надо иметь в виду всякий раз, когда мы пытаемся сопоставить какие-то факты в геологической истории Земли и эволюции биосферы. Что именно могло быть вовлечено в Кембрийский взрыв? Какие астрофизические факторы (условия) могут иметь значение для кембрийской проблемы?

К числу таких факторов «космической погоды» и «космического климата» следует отнести, прежде всего, положение Солнца (и всей Солнечной системы) среди других звезд нашей Галактики – «Млечного Пути». Установлено, что Галактика состоит из нескольких «рукавов» (Vallee, 2005), где звездная населенность и поток ГКЛ выше, чем в пространстве между рукавами. При этом важна частота вспышек Сверхновых звезд, которые считаются основным источником ГКЛ. В орбитальном движении вокруг центра Галактики Солнце не только пересекает звездные рукава, но и несколько меняет свое положение (осциллирует) относительно плоскости Галактики (Gillman, Erenler, 2008).

Как известно, земная атмосфера постоянно подвергается бомбардировке космических лучей галактического или солнечного происхождения (ГКЛ и СКЛ). Из-за временных вариаций их потоков вторжение КЛ в атмосферу Земли приводит к понижению (повышению) ионизации воздуха. Тем самым космические лучи могут активно влиять на состав атмосферы, ее электрическое состояние и, в конечном счете, на ее динамику, погоду и климат. Поток ГКЛ у Земли, в целом, антикоррелирует с уровнем солнечной активности (СА) с периодом около 11 лет (их интенсивность максимальна в эпоху минимума СА). Большие потоки СКЛ появляются на орбите Земли спорадически, после мощных возмущений в атмосфере Солнца; их связь с уровнем СА не столь однозначна, как в случае ГКЛ, а частота событий определяется динамикой солнечных магнитных полей (более подробно характеристики КЛ описаны Мирошниченко, 2011; Обридко и др., 2013).

Следует учитывать, что степень воздействия КЛ на биосферу существенно зависит от толщины и состава атмосферы. На данный момент живые существа на поверхности Земли испытывают воздействие лишь вторичных космических лучей. В начале же своего развития биосфера подвергалась жесткому прямому облучению, если не губительному, то вызывающему повсеместные мутации. Таким образом, по совокупности изученных эффектов, КЛ можно считать одним из основных постоянно действующих биотропных агентов космической погоды (Miroshnichenko, 2013).

В период Кембрийского взрыва атмосфера сильно отличалась как от современной, так и от первичной. Однако уточнение ее параметров и численная оценка потенциального мутагенного воздействия КЛ в конкретную геологическую эпоху – до сих пор нерешенная задача. В данной работе мы лишь качественно обрисовываем изменения интенсивности КЛ в обсуждаемый период времени.

Другой важный космофизический фактор – это активность Солнца. Циклические вариации общего уровня активности влияют, в частности, на величину потока ГКЛ внутри Солнечной системы, тогда как спорадические вариации (вспышки и корональные выбросы массы – КВМ) сопровождаются усиленными потоками СКЛ и геомагнитными бурями. В геологическом масштабе времени неизбежно наложение вариаций солнечной активности (СА) и долговременных осцилляций величины и знака собственного магнитного

поля Земли (их называют сменой полюсов или геомагнитными инверсиями), с которыми, по-видимому, тесно связаны также долговременные тренды в колебаниях климата. Не исключено, что на биосферу воздействуют и другие, пока неизвестные космические факторы. В целом проблему можно рассматривать в рамках концепции ко-эволюции Солнца, Земли и биосферы (Обридо и др., 2013). В дополнение к этой последней работе, мы приводим ниже новые факты и соображения в пользу указанной концепции.

МЕТЕОРИТНЫЕ ДАННЫЕ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Единственным источником (косвенных) данных о потоках ГКЛ в эпоху Кембрийского взрыва могут быть железные метеориты. Под действием КЛ в метеоритах образуются долгоживущие космогенные изотопы, в частности, изотоп ^{40}K с периодом полураспада $T_{1/2}=1.3\times 10^9$ лет, изотоп ^{36}Cl ($T_{1/2}=3.08\times 10^5$ лет) и некоторые другие. Измеряя уровень активности «образца», например, по отношению содержания $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$, можно оценить интенсивность потока космических лучей, которыми облучался метеорит за время своего существования (время экспозиции) в Солнечной системе до падения на Землю. Таким способом по имеющимся метеоритным данным удастся продвинуться по шкале времени почти до 2 млрд. л. н. (Лаврухина, Устинова, 1990).

Прямые измерения КЛ в современную эпоху дают сведения о том, что происходило в Галактике, лишь на период до 100 млн. лет назад. Между тем, за ≈ 500 млн. л., прошедших после Кембрийского взрыва, Солнце пересекло 4 галактических рукава, а биосфера Земли пережила минимум 6 значительных (массовых) вымираний (Gillman, Egenler, 2008). За это время в геомагнитном поле (ГМП) отмечены три суперхрона – три интервала времени (485–463, 312–264 и 120–84 млн. л. н. соответственно), когда ориентация ГМП не менялась. Что касается КЛ, то первые же результаты изучения 11 железных метеоритов позволили продемонстрировать (Лаврухина, 1969), что в интервале между ~ 300 – 900 млн. л. н. сильно осредненный суммарный поток КЛ в Солнечной системе мог составлять $\sim 1/3$ от современного уровня.

С другой стороны, последующие более детальные исследования железных метеоритов (компиляция данных о величине $K(41)/K(40)$ по 74 экземплярам, Voshage, Feldman, 1979), показывают отличную корреляцию между усилением КЛ и пересечением рукавов Галактики за последний миллиард лет (Shaviv, 2002). Некоторые астрофизические данные указывают на то, что около 500 млн. л. н. Солнце вошло в галактический рукав Персея с повышенной звездной населенностью, где и находилось в течение нескольких десятков миллионов лет. Были получены свидетельства того, что средний уровень интенсивности ГКЛ в этот период был значительно выше, чем в межрукавном пространстве, до вхождения Солнца в рукав Персея. В дальнейшем поток ГКЛ также изменялся в пределах 25–135 % при последующих пересечениях других галактических рукавов.

Важно отметить, что эти вариации определенным образом коррелировали с периодами глобальных потеплений и похолоданий (оледенений), но однозначного соответствия не обнаружено. К сожалению, точность определения потока ГКЛ по метеоритным данным невысока и колеблется в пределах от множителя 0.3 до 1.5. Кроме того, возникает важный методический (и физический?) вопрос: какой уровень интенсивности ГКЛ следует считать «нормальным» для биосферы – «древний» или современный? В любом случае, сама возможность значительных изменений потока ГКЛ в прошлом не вызывает никаких сомнений (Miroshnichenko, 2013).

ГИГАНТСКИЕ ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ И ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД

В связи с этим особый интерес представляет вероятность гигантских солнечных вспышек (источников больших потоков СКЛ) в настоящее время и в далеком прошлом, при другом уровне активности самого Солнца. Последние оценки такого рода (Miroshnichenko, Nymmik, 2014) указывают на крутой обрыв функции распределения событий в области малых вероятностей (т. е. больших флюенсов СКЛ). Это следует из анализа косвенных и прямых данных о солнечных космических лучах за последние ~1200÷1300 л. Для экстраполяции этих результатов в прошлое и будущее нужны соответствующие модели «раннего» и «позднего» Солнца.

Несколько иные проблемы возникают при анализе частоты вспышек сверхновых звезд – основных источников ГКЛ. В одной из последних работ в этом направлении (Svensmark, 2012) оценки частоты вспышек Сверхновых (SN) за последние ~500 млн. л. сравнивались с биологическим разнообразием морских животных за тот же период. Кривая для частоты вспышек SN рассчитывалась для каждого интервала времени, когда Солнце пересекало соответствующий рукав Галактики. Аналогично оценивалось количество ископаемых морских организмов с учетом влияния вариаций уровня океана на скорость их отложения. При этом было получено хорошее согласие двух кривых. Такая тесная корреляция астрофизических и биосферных процессов является аргументом в пользу гипотезы о сильном влиянии ГКЛ и СКЛ на эволюцию биосферы.

Результаты (Svensmark, 2012), однако, не могут считаться бесспорными. Вызывает сомнения, прежде всего, высокая точность вычисления частоты вспышек SN. Есть расхождения и с данными об одном из массовых вымираний, случившемся около 20 млн. л. н. Далее, поправка на изменение уровня океана, по-видимому, довольно существенно изменила исходный ряд палеонтологических данных, и этот пункт заслуживает дополнительной проверки. С другой стороны, существует независимый ряд климатических данных (Veizer et al., 1999) о вариациях концентрации изотопа кислорода ¹⁸O (как одного из лучших климатических индексов) на большой временной

шкале. При этом все максимумы, полученные в работе (Veizer et al., 1999), совпадают с пиками кривой (Svensmark, 2012) для частоты вспышек SN.

Новый аспект проблемы «Космические лучи и биосфера» возник в последние годы в связи с высокоточными данными эксперимента PAMELA (Adriani et al., 2011). С 15 июня 2006 г. детекторы КЛ в этом спутниковом эксперименте регистрируют, в частности, потоки протонов, ядер гелия, электронов и позитронов в диапазоне энергий от ~80 МэВ до 190 ГэВ для протонов и от ~50 МэВ до 270 ГэВ – для позитронов. Самыми обильными в составе ГКЛ являются потоки протонов и ядер гелия. Точные измерения этих потоков необходимы для понимания процессов ускорения и переноса КЛ в Галактике. Как выяснилось, в спектрах протонов и ядер гелия имеются особенности, которые нельзя объяснить ни солнечными вспышками, ни вспышками Сверхновых звезд. Иными словами, необходимо принять гипотезу о существовании дополнительных источников КЛ в указанном диапазоне энергий.

По мнению Ю.И. Стожкова (одного из участников эксперимента PAMELA), главными кандидатами на роль таких источников являются так называемые карликовые звезды из ближайшего окружения Солнца (Солнечной системы). На этих звездах наблюдается много вспышек (Shakhovskaya, 1989). Многие карликовые звезды гораздо более активны, чем наше Солнце, причем на некоторых звездах вспышки происходят чаще, чем на Солнце, а около 1 % от всех карликовых звезд могут ускорять частицы до $\sim 10^{13}$ эВ (максимальная энергия СКЛ составляет, скорее всего, не более или порядка 10^{11} эВ). На Солнце относительная яркость составляет $10^{32}/10^{33}$ (в эргах). Другие звезды могут излучать до 10^{37} эрг за время вспышки.

Зная время жизни КЛ, число карликовых звезд и частоту вспышек, можно оценить суммарное выделение энергии в форме космических лучей $\sim 10^{54}$ эрг. Эти источники находятся на расстояниях десятков или сотен парсек – очень близко к Земле по сравнению с размерами нашей Галактики (около 30 000 парсек). Все это означает, что роль КЛ в эволюции биосферы (в том числе и в период Кембрийского взрыва) может оказаться еще более существенной, чем следует из наших традиционных представлений о внешних космофизических факторах.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Даже из этого краткого обзора ясно, что факторы внешней среды – «среды обитания» (в частности, космофизические факторы) во все периоды эволюции биосферы оказывали огромное влияние на ее дальнейшую судьбу. Поскольку некоторые космические факторы имеют случайную или спорадическую природу, то представляется несомненным, что и развитие биосферы не было равномерным.

С другой стороны, в протекании природных процессов наблюдается определенная ритмика, причем на больших интервалах времени различ-

ные процессы могут даже иерархически синхронизироваться под действием сильного ритмозадающего источника (например, активности Солнца). В этом свете многие факты из области гелиобиологии (Мирошниченко, 2011) могут быть адекватно истолкованы на основе концепции эволюционно-адаптационного синдрома (Обридко и др., 2013). Таким образом, наряду с поиском новых данных о космофизических факторах, остаются актуальными, по крайней мере, две задачи:

- 1) построение теоретических моделей с учетом возможных интенсивностей излучений, воздействовавших на биосферу в прошлом;
- 2) изучение современного отклика биосистем на космофизические факторы как атавистической реакции на изменение условий среды обитания.

Настоящая работа выполнена в рамках Программы № 28 Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы». Авторы приносят благодарность руководству Программы за финансовую поддержку этих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лаврухина А.К.* 1969. Новые данные о временных и пространственных вариациях космических лучей в Солнечной системе (по метеоритным данным) // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 23. № 11. С. 1870–1876.
- Лаврухина А.К., Устинова Г.К.* 1990. Метеориты – зонды вариаций космических лучей. М.: Наука. 262 с.
- Мирошниченко Л.И.* 2011. Физика Солнца и солнечно-земных связей / Отв. ред. М.И. Панасюк. М.: НИИЯФ МГУ – Университетская книга. 174 с.; lib.qserty.ru/static/tutorials/133_Miroshnichenko_2011.pdf
http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/LIM_SolarPhysics.pdf, <http://www.izmiran.ru/ftp/>
- Обридко В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В.* и др. 2013. Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований / Отв. ред. С.В. Рожнов. Проблемы эволюции биосферы. М.: ПИН РАН. С. 66–94; <http://www.paleo.ru/institute/files/biosphere.pdf>
- Розанов А.Ю.* 1986. Что произошло 600 миллионов лет назад. М.: Наука.
- Adriani O., Barbarino J.C., Bazilevskaya G.A.* et al. 2011. PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra. Sci. express, 3 March 2011. P. 1–5.
- Gillman M., Erenler H.* 2008. The galactic cycle of extinction // Intern. j. of astrobiol. V. 7(1). P. 17–26.
- Miroshnichenko L.I.* 2013. Cosmic rays and evolution of the biosphere: search for new approaches // Proc. int. conference “Space weather effects on humans in space and on earth” (Space research institute RAS, Moscow, 4–8 June 2012). P. 110–136; <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>
- L.I. Miroshnichenko, R.A. Nymmik.* 2014. Extreme fluxes in solar energetic particle events: methodological and physical limitations // Radiation measurements. V. 61. P. 6–15.

- Shakhovskaya N.I.* 1989. Stellar flare statistics – physical consequences // *Solar phys.* V. 121. № 2. P. 375–386.
- Shaviv N.J.* 2002. Cosmic ray diffusion from the Galactic spiral arms, iron meteorites, and a possible climatic connection // *Phys. rev. lett.* V. 89. № 5. P. 051102-1 – 051102-4.
- Svensmark H.* 2012. Evidence of nearby Supernovae affecting life on earth // *Month. not. roy. astronom. soc.* V. 423(2). P. 1234–1253.
- Valleé J.P.* 2005. The spiral arms and interarm separation of the Milky Way: An updated statistical study // *Astron. j.* V. 130. P. 569–575.
- Veizer J., Ala D., Azmy K. et al.* 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater // *Chemical geol.* V. 161. P. 59–88.
- Voshage H., Feldmann H.* 1979. Investigations of cosmic-ray produced nuclides in iron meteorites, 3: Exposure ages, meteoroid sizes and sample depths determined by spectrometric analyses of potassium and rare gases // *Earth planet. sci. lett.* V. 45. P. 293–308.

COSMOPHYSICAL SITUATION IN THE EPOCH OF CAMBRIAN EVOLUTION EXPLOSION

L.I. Miroshnichenko, O.V. Khabarova

Based on available published data, we consider a cosmophysical situation near the Earth in the epoch of so-called Cambrian evolution explosion. Some astrophysical data provide, in particular, certain evidence of that about 500 million years (Myr) ago the Sun has entered into the Perseus arm of the Milky Way galaxy with enhanced density of star population, where it has spent a time of several tens of Myr. According to not numerous meteorite data, average level of galactic cosmic ray (GCR) intensity during that period was considerably higher than in the space between the galactic arms, before the Sun entered the Perseus arm. Later on the GCR flux seemed to be varied within the limits from 25% to 135%, during subsequent crossings of other galactic arms. These variations displayed certain correlation with the period of global warmings and coolings (freezings), but unambiguous correspondence was not found. Unfortunately, an accuracy of the determination of GCR intensity by meteorite data changes within the limits from 0.3 to 1.5. To obtain more reliable conclusions, we are needed in additional astrophysical data. Also, it is necessary to construct and apply a new model of GCR propagation in the Galaxy with taking into account the characteristic ages of cosmic rays observed near the Earth's ($\sim 10 \div 100$ Myr) as well as the occurrence rate and contribution from Supernova bursts and a probability of giant increases of the fluxes of solar cosmic rays (SCR) in the remote past. It would also be erroneous to exclude possible role of geomagnetic field inversions, oscillations of the Sun's position in the Galaxy and other (yet unidentified) factors.