

ИЗОТОПНЫЕ СЛЕДЫ АКТИВНОСТИ РАННЕГО СОЛНЦА

Васильев Г.И.¹, Мелихова Е.С.², Павлов А.К.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург Россия

ISOTOPE TRACES OF EARLY SUN ACTIVITY OF FLARES

Vasilyev G.I.¹, Melikhova E.S.², Pavlov A.K.¹

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St-Petersburg, Russia

Young fast-rotating G-class stars show large number of powerful flares. It is assumed that in the first 700 million years of the existence of the Sun, 250 flares per day take place with a hard spectrum and energy release comparable to the Carrington event. Solar cosmic rays (SCRs) bombarding the atmosphere produce carbon and nitrogen isotopes by nuclear reactions in the atmospheres of terrestrial planets. The ratios of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in the planets' atmospheres increase as a result of the accumulation of heavy isotopes over the early Sun's activity period. The production of these isotopes depends on the estimated value of the proton power-law index and on the composition of early atmospheres. At the same time, the absence of magnetic fields on Venus and Mars creates the possibility of a greater effect from the effect of SCRs. The modern isotope ratios of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in the atmospheres of Earth, Mars and Venus set limitations on the early Sun activity. In the atmosphere of early Mars (if its mass equals to modern) the isotope ratio of $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ would increase by tens of percent, and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ – several times, which contradicts the measurements. To explain the increase of isotope ratios one can assume that the frequency of powerful flares in the early Sun should have been smaller or the energy spectrum – softer. On Venus the isotopic ratios under the influence of SCRs increase within the measurement error.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-33-36

Наблюдения молодых быстро вращающихся звезд класса G показали существование сверхмощных вспышек с энергосвечением до 10^{36} эрг [1–3]. Вспышки с энергосвечением более $5 \cdot 10^{34}$ происходят с частотой 0.1 в сутки. Вспышки с энергосвечением менее 10^{34} эрг на солнцеподобных звездах экспериментально не наблюдались, так как это ограничивалось чувствительностью прибора. В работе [4] было предположено, что их частота подчиняется степенному закону, полученному для вспышек более высоких энергий. В ней рассматривается эволюция ранней атмосферы Земли, приводящая к возможности возникновения жизни. Предполагается, что во время первых 700 млн. лет существования Солнца в сутки происходило 250 вспышек с энергосвечением около 10^{33} эрг и показателем степенного спектра протонов $\gamma = 2.15$. В наше время γ для большинства солнечных вспышек находится в пределах 2–6. Кроме того, не все спектры протонов во всем диапазоне их энергий степенные. Проникающие в атмо-

сферу протоны в ядерных реакциях образуют вторичные частицы. При одинаковом потоке на границе атмосферы при большем значении γ их число меньше. Во взаимодействиях первичных и вторичных частиц образуются стабильные ядра с отличным от материнских ядер зарядом и атомным числом, в том числе изотопы углерода и азота. За длительный промежуток времени под действием вспышек на Солнце в атмосферах планет земной группы должны изменяться изотопные отношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ и $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. В нашей работе рассматриваются изотопные отношения в ранних атмосферах Марса и Венеры. На раннем этапе их эволюции у них не было магнитного поля, что упрощает расчеты. Поток протонов на единицу площади на их орбитах обратно пропорционален квадрату отношения их радиусов к радиусу Земли.

Согласно современным моделям, изотопный состав газов, захороненных в марсианском метеорите Allan Hills 84001, отражает изотопный состав ранней атмосферы Марса [6]. Вещество этого метеорита затвердело 4.091 млрд. лет назад. Поэтому изменение изотопных отношений в атмосфере Марса можно рассматривать относительно изотопных отношений в этом метеорите.

Образование изотопа ^{15}N происходит в ядерных реакциях протонов и нейтронов с ^{16}O . В атмосферах с малым содержанием кислорода ^{15}N образуется преимущественно при захвате нейтрона ^{14}N . Изотоп ^{13}C образуется из ^{14}N . При этом скорости образования тяжелых изотопов и более распространенных изотопов отличаются незначительно. Влияние реакций скалывания на количество ^{14}N и ^{12}C несущественно, так как их исходное содержание в атмосферах на порядки больше. За начальные изотопные отношения взяты изотопные отношения в атмосфере Земли (см. таблицу).

Таблица. Изотопные отношения, умноженные на 10^3 .

Изотоп. отн.	Земля	Марс	Венера	ALH84001
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	3.66 ± 0.01	5.8 ± 0.4	3.7 ± 0.7	3.875
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	11.23 ± 0.05	11.75 ± 0.04	12 ± 2	11.75 ± 0.09

С помощью GEANT4 [5] мы провели моделирование образования изотопов ^{13}C и ^{15}N при различных химических составах атмосфер и при различных показателях γ спектров солнечных космических лучей (СКЛ). В этой работе мы рассматривали диапазон значений γ от 2 до 2,3. Изменение изотопных отношений в атмосфере Марса существенно зависит от показателя спектра СКЛ для раннего Солнца и приведены для $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (Рис.1) и для $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ (рис.2). В зависимости от показателя γ увеличение изотопных отношений для углерода составляет от 6,1% до 51,7%. В результате получается значение, значительно превышающее измеренное марсоходом Curiosity (см. таблицу) [7]. В пределах ошибок измерений изотопное отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, измеренное в атмосфере Марса и измеренное в метеорите ALH84001, сов-

падают. Отсутствие значимого обогащения ^{13}C в атмосфере может быть связано с наличием дополнительного большого резервуара углекислого газа и обменными процессами между ним и атмосферой. В отсутствии такого резервуара необходимо, чтобы спектр СКЛ раннего Солнца был существенно мягче ($\gamma \geq 2,6$) по сравнению с предложенным в модели [4].

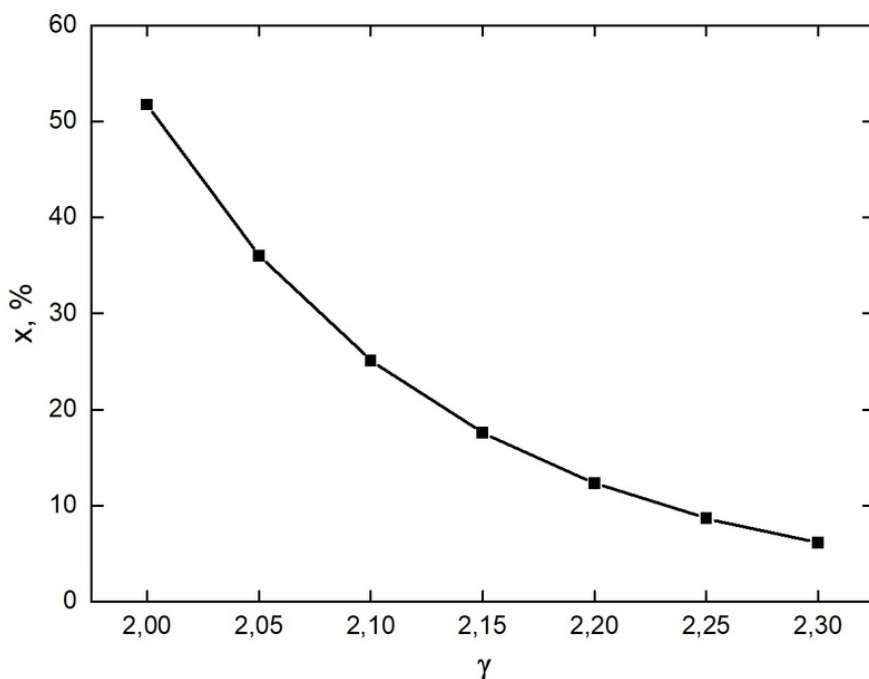


Рис. 1. Зависимость изменения изотопного отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в атмосфере Марса от показателя спектра протонов солнечных вспышек при флюенсе из работы [4].

Результаты наших расчётов показывают, что за 700 млн. лет изотопное отношение $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ увеличивается на десятки и сотни процентов при тех же предположениях о виде спектра и флюенсе протонов [4], что противоречит современному значению (см. таблицу). При более мягком спектре протонов ($\gamma = 2,5$) расчетные и экспериментальные отношения совпадают. Изотопное отношение $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ в метеорите ALH84001 значительно меньше, чем современное на Марсе (см. таблицу). Поэтому для согласования с экспериментальными данными необходимо поставить еще более жесткие ограничения ($\gamma = 2,9$). При этом мы получили минимальные ограничения, не учитывающие уход азота из верхней атмосферы Марса, который приводит к увеличению изотопного отношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$.

Расчеты показывают, что увеличение изотопного отношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ на Венере за 700 млн. лет активности раннего Солнца составляет от 0,16% до 0,88% (в зависимости от показателя γ). Аналогично увеличение изотопного отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ — от 0,005% до 0,04%. Это значительно меньше, чем неопределенность измерений изотопных отношений на Венере в наши дни [8]. При увеличении точности измерений изотопных отношений на Венере можно будет получить ограничения на активность раннего Солнца.

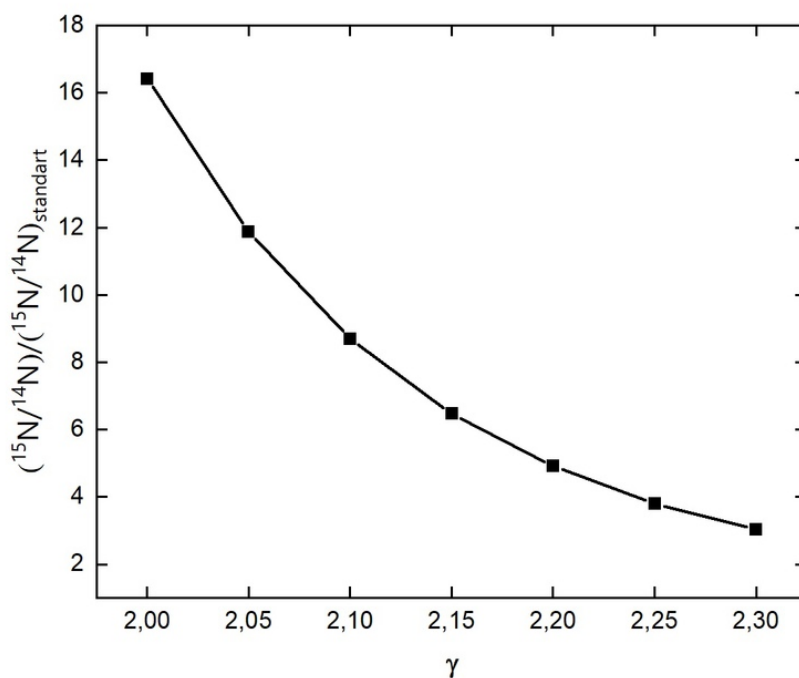


Рис. 2. Зависимость изменения изотопного отношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ в атмосфере Марса от показателя спектра протонов солнечных вспышек при флюенсе из работы [4].

Таким образом, из анализа изотопного отношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ в атмосфере Марса и в марсианском метеорите Allan Hills 84001 было получено, что спектры протонов в солнечных вспышках должны быть более мягкими, чем предполагалось в работе [4] – показатель спектра $\gamma = 2,9$. Из анализа изотопного отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ было получено, что на Марсе вероятно существует резервуар углерода, обменный с атмосферой.

Литература

1. Maehara H. et al. // Nature, 2012, **485**, p. 478.
2. Shibayama T. et al. // Astrophysical J. Suppl. S., 2013, **209**, p. 5.
3. Notsu Y. et al. // Astrophysical J., 2019, **876**:58.
4. Airapetian V.S. et al. // Nature Geoscience, 2016, **9**, p. 452.
5. Allison J. et al. // Nucl. Instr. and Methods, 2016, **835**, p. 186.
6. Treiman A.H. et al. // Planetary and Space Science, 2000, **48**, 1213.
7. Webster C. R. et al. // Science, 2013, **341**, p.260.
8. Bézard B. et al. // Icarus, 1987, **72**(3), p. 623