

КОСМИЧЕСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ ПАТРУЛЬ И НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПИЛОТИРУЕМОГО ПОЛЕТА К МАРСУ

© 2005 г. В. В. Коваленок, канд. военных наук*, С. В. Авакян**, доктор физ.-мат. наук;
О. К. Боровкова***, Н. А. Воронин**

* Федерация космонавтики России, Москва

** ВНЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

*** Институт физики Земли РАН, Москва

В межпланетном полете после больших солнечных вспышек космонавты подвергаются воздействию энергичных солнечных протонов и электронов. Особенно сильно их воздействие при выходах в открытый космос или пребывании (в будущем) на поверхности Марса в экспедиции посещения. Такие частицы поступают на орбиты Земли и Марса с задержкой в несколько часов относительно солнечного рентгеновского и УФ излучений. Поэтому всегда имеется время для предсказания их появления, в частности, с помощью рентгеновско-ультрафиолетового радиометра из комплекса аппаратуры “Космический солнечный патруль” (КСП), разрабатываемого соавторами статьи.

В процессе пилотируемого полета к Марсу организм человека длительное время будет находиться вне области воздействия магнитного поля Земли и его пульсаций, что может, в соответствии с выполненными в орбитальных полетах наблюдениями, создать у экипажа состояние дискомфорта. Предлагается, наряду со специальными проверяющими эти наблюдения экспериментами, исследовать связь между поведением геомагнитных пульсаций и УФ вспышками, регистрируемыми аппаратурой КСП.

Коды OCIS: 000.1430, 000.3110.

Поступила в редакцию 06.04.2005.

Введение

На Международной конференции, посвященной системам и технологиям будущего изучения и освоения космоса [1], основное внимание было уделено анализу готовности пилотируемого полета к Марсу, в частности, жизнеобеспечению экипажа космонавтов, состоящего, по предположениям на текущий момент, из шести человек.

В докладе [2] рассматривались вопросы радиационной безопасности экипажа на начальном участке полета, когда необходимо принять во внимание наличие радиационных поясов Земли, а также губительную роль потоков солнечных энергичных протонов. Эти протоны, как известно, появляются в виде солнечных протонных событий (СПС) после сильных вспышек на Солнце. В нашем докладе [3] предложено использовать данные постоянного “Космического солнечного патруля” (КСП) для предупреждения экипажа космонавтов о СПС как во время перелета, так и после посадки на поверхность Марса. В [3] также поднята и детально рассмотрена новая и, по-видимому, важная для длительных межпланетных экспедиций проблема психофизического состояния экипажа в отсутствие электромагнитных полей и излучений, в том числе ионосферы, к которым эволюционно адаптирован человек.

Обнаружение солнечного протонного события по данным “Космического солнечного патруля”

Рентгеновское и крайнее УФ излучение Солнца и потоки протонов мегаэлектронвольтных энергий при СПС являются наиболее информативными и

одновременно наиболее эффективными проявлениями солнечной вспышечной активности. Во-первых, они сильнее всего возрастают во время вспышек – на несколько порядков величины. Во-вторых, именно в них сосредоточена основная энергия вариабельности солнечной активности. Так, излучение Солнца в области спектра от 0,1 до 200 нм дает на орбите Земли поток энергии, составляющий $0,1 \text{ Вт м}^{-2}$. При этом поток в линии L_{α} атома водорода ($\lambda = 121,6 \text{ нм}$) в среднем равен $0,004 \text{ Вт м}^{-2}$, поток солнечных протонов (солнечных космических лучей) $0,002 \text{ Вт м}^{-2}$, поток галактических космических лучей $7 \times 10^{-6} \text{ Вт м}^{-2}$, наконец, поток энергии, переносимой солнечным ветром $3 \times 10^{-4} \text{ Вт м}^{-2}$ [4]. Таким образом, наладив мониторинг коротковолнового, особенно крайнего ВУФ и мягкого рентгеновского, излучения Солнца и на основе этого патруль опасных для космонавтов солнечных протонных событий, мы решим проблему контроля солнечной вспышечной активности применительно к безопасности пилотируемых межпланетных полетов.

С самого начала полета после выхода космического корабля из земной магнитосферы (на расстоянии примерно десяти радиусов Земли) в период больших солнечных вспышек космонавты будут подвержены воздействию солнечных энергичных протонов и электронов. Эти всплески могут быть предсказаны по результатам мониторинга солнечного рентгеновского и крайнего УФ излучений, потому что оно доходит до орбиты Земли приблизительно через 8 мин после вспышки, в то время как частицы прибывают с задержкой от десятков минут до 10 ч и более. Поэтому имеется время (а для орбиты Марса оно еще в 1,5 раза больше), чтобы предсказать неблагоприятное влияние и защитить космонавтов.

Действительно, имеются многочисленные данные о связи рентгеновского излучения Солнца в периоды вспышек с появлением СПС. Так, в [5] показано, что лучшим индикатором появления СПС является интегральная интенсивность вспышечного потока рентгеновского излучения в диапазоне короче 0,8 нм: если она превышает 10^3 эрг см⁻², СПС регистрируется в окрестности Земли в 84% случаев. Играть роль продолжительность и яркостная температура вспышки. В [6] уточнено, что порогом потока рентгеновского излучения в диапазоне 0,1–0,8 нм для появления СПС является значение порядка 20 эрг см⁻². Очевидно, что критерии появления, а главное, сведения об интенсивности потока протонов (с энергиями больше 10 МэВ), их спектральном составе могли бы быть существенно качественнее, если бы существовал постоянный мониторинг не только в данной, очень узкой, области рентгеновского диапазона, но и во всей области мягкого рентгеновского ($\lambda \leq 10$ нм) и крайнего УФ излучения ($\lambda \leq 120$ нм) солнечного спектра, как это позволит контролировать аппаратура постоянного КСП, разработанная в ГОИ [7].

Данные о характерном для появления СПС спектре коротковолнового излучения можно будет получить уже на первом этапе космического эксперимента на околоземной солнечно-синхронной орбите в полном комплекте спектрометрической аппаратуры в составе фильтрового радиометра и рентгеновско-ультрафиолетового дифракционного спектрометра. А на основе полученных знаний можно разрабатывать методику определения опасных для межпланетной экспедиции ситуаций по показаниям одного радиометра, габариты и масса которого (около 3 кг) позволяют установить его непосредственно на борту корабля.

Исследования возможности связи между солнечными вспышками и геомагнитными пульсациями

Одним из соавторов статьи (В.В. Коваленком) в период 140-суточного полета в июне–ноябре 1978 г. во время визуально-инструментальных наблюдений ночных эмиссий верхней ионосферы Земли на средних широтах (в планетарном масштабе) фиксировались повышенная нервная возбудимость членов экипажа и конфликтность взаимоотношений его членов, выражавшаяся и в конфликтах при радиопереговорах с ЦУПом [8, 9]. Однако удивительно, что чувствительность к очень низким уровням амплитуды вариаций геомагнитного поля сохраняется даже внутри металлического корпуса орбитальной станции, хотя в нем, конечно, есть иллюминаторы. Возможно, здесь сказывается отсутствие поглоще-

ния этого типа пульсаций в ионосфере, так как орбита станции располагалась выше ионосферы [10]. Поэтому обычное наличие пульсаций воспринимается организмом космонавтов устойчиво, как нечто должное, обыкновенное, а вот их исчезновение создает у экипажа дискомфорт. Следует подчеркнуть, что подобные результаты не противоречат анализу пресловутой проблемы “неблагоприятных дней” [11] и подтверждают существование воздействия “космической погоды” на состояние человека в виде реакции на геомагнитные пульсации.

Впервые гипотезу об определяющей роли исчезновения геомагнитных пульсаций (короткопериодических вариаций геомагнитного поля), прежде всего Рс2–Рс4 с периодами от 5 до 150 с, в нарушениях деятельности центральной нервной системы выдвинули авторы [12]. Подчеркнем, что при этом экспериментально был отмечен другой факт – особое влияние смены полярности (более всего при смене отрицательной на положительную) секторов межпланетного магнитного поля (ММП). При объяснении этого феномена в [12] предложено учесть, что подвергаемый стрессу, невесомости и др. факторам организм нуждается в почти постоянном воздействии на него квазисинусоидальных колебаний электромагнитного поля определенной частоты от внешних источников. В [12] отмечено, что таким внешним воздействием могут быть пульсации геомагнитного поля, исчезающие иногда по всей Земле одновременно. Периодам исчезновения таких воздействий по [12] соответствуют определенные условия в межпланетной среде во время некоторых магнитных бурь, после внезапных импульсов и почти всегда при пересечении Землей границы между секторами ММП.

Вообще, естественное электромагнитное поле Земли представляет собой целый спектр электромагнитных “шумов” в широком диапазоне частот от 10^{-3} до 10^9 Гц [13]. Недавно обращено внимание и на диапазон более высоких частот – микроволновое излучение ионосферы [14]. Постоянно существующий на поверхности Земли фон электромагнитных колебаний формируется несколькими источниками. Среди них микропульсации геомагнитного поля, очень низкочастотные излучения магнитосферы, атмосферники (низкочастотная часть спектра излучения молниевых зарядов). Амплитуда колебаний (напряженность поля) максимальна в диапазоне очень низких частот (менее 5 Гц), где обычно регистрируется магнитная составляющая – короткопериодические колебания геомагнитного поля (микропульсации), имеющие не только горизонтальную, но и вертикальную электрические составляющие с напряженностью до нескольких вольт на метр. Микропульсации, так же как и колебания на высоких

частотах (килоггерцы), генерируются в магнитосфере либо на ее границе.

Разные типы пульсаций появляются преимущественно в определенные периоды суток. В периоды возмущений (магнитные бури) наблюдается глобальное возбуждение микропульсаций, и тогда они могут регистрироваться десятки часов подряд по всему земному шару. Началу самой бури предшествует появление колебаний в полосе Pc1 – так называемых “жемчужин”. В этих колебаниях несущая частота $1 \pm 0,3$ Гц модулирована по амплитуде с периодом 2–5 мин.

Все эти электромагнитные колебания, составляющие обычный фон, исчезают с выходом межпланетного космического корабля за границы магнитосферы, и через несколько первых суток полета космонавты окажутся вне привычного электромагнитного “шума”, как и вне геомагнитного поля. Как показано в [15], гипогеомагнитные поля тоже влияют на человека. При этом человек может ощущать (до болевого синдрома в области воздействия) ослабленное в 1000 раз поле, а также и усиленное примерно в те же 1000 раз. Неизвестно, однако, как скажется одновременное отсутствие и геомагнитного поля, и электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот – от низких (в том числе в области ритмов мозга, сердца и т. п.) до самых высоких и крайне высоких частот, влияющих при резонансном воздействии на клетки организма человека [14]. Следовательно, в ближайшие годы на подготовительном этапе первого межпланетного полета необходимо исследование синергетических эффектов воздействия на человека на фоне гипогеомагнитных полей реально ожидаемого отсутствия привычных, “задающих” колебаний электромагнитного фона,

прежде всего геомагнитных пульсаций. Подчеркнем, что полеты и посадка на Луну не могут быть достаточно близким аналогом обсуждаемой ситуации, поскольку полеты вне магнитосферы Земли продолжались менее недели.

Сведения о периодах наблюдения психофизической неустойчивости и о наличии или, как правило, отсутствии геомагнитных пульсаций в эти периоды приведены в таблице. Там же представлены основные характеристики этих пульсаций: период (частота) и амплитуда. Сведения о проявлении геомагнитных пульсаций получены по данным измерений Геофизической обсерватории “Борок” Института физики Земли АН СССР. Важно, что в первые 6 дат (см. таблицу) космонавтами В.В. Коваленком, А.С. Иванченковым и В.П. Савиных фиксировалось обычное в таких случаях “планетарное свечение второго эмиссионного слоя”, т. е. эмиссионное излучение ночной F-области земной ионосферы с привязкой по времени в указанные в таблице периоды. Следующие четыре события привязаны по времени на основании данных об усиленном эмиссионном свечении ночной F-области (в красной линии атома кислорода $\lambda = 630$ нм) по данным Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР [16], так как космонавты в период с 6 по 9 июля 1978 г. наблюдали “планетарное свечение” почти на каждом витке (на его ночной стороне).

В таблице собраны сведения о четырех типах геомагнитных пульсаций из следующих соображений. Пульсации Pi1C, как и все иррегулярные пульсации, обычно характеризуют периоды геомагнитного возмущения. Однако в периоды наблюдения космонавтами планетарного свечения его визуальная картина коренным образом отличалась от картин полярных

Геомагнитные пульсации в периоды наблюдения явления реакции ночной верхней ионосферы на солнечные вспышки

Тип пульсаций		Иррегулярные			
		Pi1C	Pc2	Pc3	Pc4
Частота, Гц		менее 1	$2 \times 10^{-1} - 6 \times 10^{-2}$	$(6-2) \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-3}$
Период, с		1–40	5–15	15–45	45–150
Амплитуда, 10^{-5} Э		0,02	0,6	0,6	до 10
Дата	Время, UT	Наличие пульсаций на обсерватории “Борок”			
14.08.78	00.45–00.50	очень слабые Pi1C	нет	есть	нет
16.09.78	20.00–03.00	нет	нет	с 00.40 есть	нет
28.10.78	20.30–21.16	нет	нет	нет	нет
28.10.78	22.44	нет	нет	нет	нет
03.05.81	00.38	нет	нет	нет	нет
03.05.81	15.52–15.56	нет	нет	нет	нет
06.07.78	23.30–01.00	нет	нет	есть	нет
07.07.78	18.00–20.30	нет	нет	нет	нет
08.07.78	20.00–22.30	нет	нет	нет	нет
09.07.78	18.20–20.10	нет	нет	нет	нет

сияний, которые также могли наблюдаться на средних и низких широтах, но только во время сильных геомагнитных бурь [17, 18]. В [10] детально рассмотрена и возможность согласно [19] связи свечения наблюдающейся красной эмиссии $\lambda = 630$ нм с появлением колебаний класса P11C. Однако в даты, рассматриваемые в таблице, этого не происходит и, следовательно, явление “планетарного свечения второго эмиссионного слоя” носит иной характер. Остальные пульсации Pс2–Pс4 относятся к устойчивому типу и обычно фиксируются регулярно.

Из данных таблицы следует, что практически все время во все указанные космонавтами периоды (как “планетарного свечения”, так и одновременно повышенной конфликтности) зафиксировано отсутствие геомагнитных пульсаций и устойчивого типа, и иррегулярного.

Важным обстоятельством, обеспечивающим адекватность результатов выделенных особых периодов в геофизической погоде (как раз без пульсации типа P11C по данным Геофизической обсерватории “Борок”), является то, что наблюдения за планетарным свечением верхней ионосферы (а именно оно характеризует картину реакции ночной ионосферы на солнечные вспышки [10, 20]) с борта орбитальной научной станции “Салют-6” проводились, как правило, в ночное время по часовому поясу обсерватории “Борок”. А поэтому обнаруженное отсутствие P11C, действительно, необычное явление, поскольку суточный максимум этого вида пульсаций приходится как раз на 23.00–1.00 UT.

Интерпретация результатов наблюдения оптических картин излучения верхней атмосферы Земли с борта низкоорбитальной пилотируемой космической станции “Салют-6” показала [10, 20], что одним из необычных явлений в космической погоде, соответствующих этим случаям, было отсутствие геомагнитных пульсаций. При этом всегда за 1–2 суток происходила смена знака секторов межпланетного магнитного поля. Обнаруженное планетарное свечение было интерпретировано как новое геофизическое явление – реакция ночной верхней атмосферы на УФ солнечные вспышки [10, 20]. До настоящего времени мониторинг этого диапазона солнечного спектра отсутствует и именно для решения этой задачи предназначена аппаратура КСП [7].

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Из опыта орбитальных полетов на станции “Салют-6” [10, 20] известно, что аномальное планетарное свечение второго эмиссионного слоя верхней атмосферы Земли (*F*-области ее ионосферы) возрастает именно во время солнечных вспышек. При этом, по данным мировой сети станций ионосферного радиозондирования, расположенных в это время на дневной стороне, известно, что

– возникающие во время данных вспышек внезапные ионосферные возмущения имеют низкий балл (1^{-1^0}), но регистрируются большим числом станций с достоверностью, близкой к максимальной;

– при измерениях в линии H_{α} вспышка классифицируется обычно как слабая (субвспышка) с баллом от SN до 1F;

– при мониторинге рентгеновского излучения Солнца в большинстве таких вспышек сильного увеличения потока в области спектра 0,05–0,8 нм не зафиксировано [21, 22].

Итак, несмотря на то что в оптическом и рентгеновском диапазонах вспышка на Солнце является слабой, она вызывает хорошо фиксируемые, хотя и низкого балла, внезапные ионосферные возмущения. Величина этих возмущений в основном зависит от неизмеряемого жесткого УФ излучения солнечной вспышки. Это излучение приводит главным образом к возмущениям типа SFD, SCNA и SITEC [23] (в *F*-области), которые обычно не регистрируются наземными ионосферными станциями. В нижней ионосфере величина вклада УФ солнечной вспышки ограничена [24].

Основной проблемой для подтверждения данной гипотезы является отсутствие вплоть до настоящего времени мониторинга крайнего УФ излучения Солнца не только в периоды вспышек, но и в обычных, спокойных условиях. Это связано исключительно с техническими и методологическими трудностями абсолютных измерений потока ионизирующего излучения Солнца и практически осуществимо, по-видимому, только после запуска в космос аппаратуры КСП с исключительно “солнечно-слепыми” приемниками крайнего УФ излучения разработки ГОИ.

Следует отметить, что известны [25] закономерности возбуждения специфических геомагнитных пульсаций для периодов наиболее мощных жестких рентгеновских солнечных вспышек. Исчезновение пульсаций в периоды солнечных УФ вспышек впервые было зарегистрировано в [10, 20]. После организации непрерывного контроля потока ионизирующего солнечного излучения, в том числе крайнего УФ излучения, вспышек на Солнце с помощью аппаратуры КСП появится возможность полномасштабного исследования корреляции таких вспышек и с отсутствием геомагнитных пульсаций, и с психофизическим состоянием космонавтов в полете.

Заключение

В статье обсуждены первоочередные задачи, решение которых необходимо для обеспечения безопасности пилотируемого полета к Марсу:

полный контроль уровня потоков и характера спектра солнечной коротковолновой активности, в

том числе с помощью малогабаритного рентгеновско-ультрафиолетового радиометра из комплекса аппаратуры “Космический солнечный патруль”, установленного непосредственно на борту межпланетного космического корабля;

исследование ситуации, когда на фоне гипоманитных полей отсутствуют естественные электромагнитные “шумы”, особенно геомагнитные пульсации, сопровождающие эволюцию человечества.

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН, профессору М.М. Мирошникову за полезные замечания и помощь в публикации этой статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Intern. Conf. “Systems and technologies for future exploration and development of space”. ISTC, Moscow, June 2003.
2. Петров В.М. Особенности разработки радиационных нормативов для пилотируемой экспедиции на Марс // Тез. докл. Междун. конф. “Системы и технологии будущего изучения и освоения космического пространства”. Москва, 2003. С. 39–40.
3. Авакян С.В., Афанасьев И.М., Воронин Н.А., Савушкин А.В. Успехи в создании аппаратуры для постоянного солнечного патруля в рамках проектов МНТЦ // Тез. докл. Междун. конф. “Системы и технологии будущего изучения и освоения космического пространства”. Москва, 2003. С. 103–104.
4. Lean J. The Sun’s variable radiation and its relevance for Earth // *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*. 1997. V. 35. P. 33–67.
5. Garcia H.A. Temperature and hard X-ray signatures for energetic proton events // *Astrophys. J.* 1994. V. 420. № 1. P. 422–432.
6. Kubo Y., Akioka M. Existence of thresholds in proton flares and application to solar energetic particle alerts // *Space Weather*. 2004. V. 2. S01002.
7. Авакян С.В., Афанасьев И.М., Воронин Н.А., Савушкин А.В., Шишацкая Л.П. Тестирование рентгеновско-ультрафиолетового спектрометра космического солнечного патруля // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72. № 8. С. 54–59.
8. Коваленок В.В., Авакян С.В. Краски космоса // В сб.: “Космос”. Л.: ФТИ, 1987. С. 96–101.
9. Авакян С.В. Новый фактор в физике солнечно-земных связей – ридберговские состояния атомов и молекул // Тез. докл. на Междун. конф. по физике солнечно-земных связей. Алматы, 1994. С. 3–5.
10. Авакян С.В., Коваленок В.В., Солоницына Н.Ф. Ночная F-область ионосферы в периоды вспышек на Солнце. Алма-Ата: Наука, 1984. 150 с.
11. Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Рассказ о космической погоде. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 160 с.
12. Николаев Ю.С., Рудаков Я.Я., Мансуров С.М., Мансурова Л.Г. Секторная структура ММП и нарушения деятельности центральной нервной системы // *Проблемы космической биологии*. 1982. Т. 43. С. 51–59.
13. Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения геомагнитного поля Земли. Ч. 4. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд. ЛГУ, 1976.
14. Авакян С.В. Микроволновое излучение ионосферы как фактор воздействия солнечных вспышек и геомагнитных бурь на биосферу // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72. № 8. С. 41–48.
15. Холодов Ю.А., Лебедева Н.Н. Электромагнитная биология / Под ред. Айрапетянц М.Г. М.: Наука, 1992. 135 с.
16. Авакян С.В., Кудряшев Г.С., Фишкова Л.М. Об усилении эмиссии O/I/630 нм свечения неба во время солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1985. Т. 25. № 3. С. 415–419.
17. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В. Атмосфера Земли с “Салюта-6” // *Гидрометеиздат*, 1981. 207 с.
18. Авакян С.В., Евлашин Л.С., Коваленок В.В., Лазарев А.И., Титов В.Г. Наблюдения полярных сияний из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
19. Боровкова О.К., Боровков Ю.Е., Троицкая В.А. и др. О связи усиления эмиссии 6300 Å в средних широтах с геомагнитными пульсациями // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1983. Т. 23. № 3. С. 494–496.
20. Авакян С.В., Иванченков А.С., Коваленок В.В., Лазарев А.И. Пространственно-временное распределение эмиссионного излучения ночной верхней ионосферы Земли / В кн.: “Атмосферно-оптические явления по наблюдениям с орбитальных научных станций “Салют””. Тарту, 1980. С. 32–45.
21. Solar-Geophys. Data. – Prompt reports, 1978. № 409–412.
22. Solar-Geophys. Data. – Prompt reports, 1981. № 441.
23. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли // М.: Мир, 1980. С. 286–304.
24. Иванов-Холодный Г.С., Леценко Л.К., Одинцова И.Н. Соотношение рентгеновского и УФ-излучений солнечных вспышек в ионизации E-области ионосферы // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1976. Т. 16. № 2. С. 246–250.
25. Луковникова В.И., Пархомов В.А. Закономерности возбуждения геомагнитной пульсации в результате изменения проводимости ионосферы во время солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1983. Т. 23. № 6. С. 992–996.