БЕЗРОДНЫХ И.П. ИКИ РАН

ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ

СПИСОК НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

В настоящем отчете использованы следующие нормативные документы:

ГОСТ 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. Госстандарт России. Москва.

ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. Москва.

ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно –энергетического распределения плотности потока электронов. Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. Москва.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

КА космический аппарат

КЛ космические лучи

РПЗ радиационный пояс Земли

СКЛ солнечные космические лучи

ГКЛ галактические космические лучи

ЛПЭ линейная передача энергии

МУВ межпланетная ударная волна

АМС автоматическая межпланетная станция

МГД магнитогидродинамические

СВАН спектрально -временной анализ

ММП межпланетное магнитное поле

МГД магнитогидродинамические

СА солнечная активность

СОДЕРЖАНИЕ

2. ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ…… …….....4

2.1. Этапы вывода космического аппарата за пределы магнитосферы Земли ..4
2.2 Оценка поглощенной дозы радиации за период пересечения КА радиационных поясов при низкой интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ…….....5
2.3 Свойства межпланетной среды…….....7
2.4 Энергетические спектры, химический состав и проникающая способность частиц ГКЛ……..…….……..20
2.5. Доза на орбите и поверхности Луны от частиц ГКЛ и СКЛ……30
Заключение.…….……. ….……35
Список использованных источников……. ……..…36

2. ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ

Данные многолетних исследований Луны, выполненные до 1991 г. с помощью автоматических и пилотируемых космических аппаратов представлены в монографии [1]. В отчете приведены результаты исследований, полученные в основном после 1991.

2.1 Этапы вывода космического аппарата за пределы магнитосферы Земли.

При пересечении радиационных поясов, для минимизации поглощенных доз радиации, получаемой от частиц внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ), необходимо выбирать для старта такие моменты времени, когда внешний радиационный пояс содержит минимальные потоки релятивистских элетронов. Динамика радиационно опасных для космического аппарата (КА) энергичных частиц внешнего РПЗ зависит от состояния межпланетной среды и может быть прогнозируема [2].

Также как и при полетах к планетам солнечной системы, вывод КА за пределы магнитосферы для полета к Луне, вероятно, будет осуществляться в несколько этапов [3]. Первый этап – вывод КА на опорную круговую орбиту с высотой около 200 км, которая проходит под РПЗ. Орбита хорошо защищена магнитным полем Земли от проникновения на нее основной массы частиц СКЛ и ГКЛ, по этой причине, воздействием потоков частиц РПЗ, СКЛ и ГКЛ на КА, при его нахождении на данной орбите, можно пренебречь. Второй этап – с помощью разгонного блока, вывод КА на промежуточную орбиту с типичными параметрами: высотой перигея ≈ 220 км; высотой апогея ≈13000 км; наклонением орбиты ≈51º; аргументом перигея ≈ 270º или 90º; периодом, в течение которого КА на промежуточной орбите делает полный оборот, около 4 часов. Особенность промежуточной орбиты состоит в том, что вблизи перигея она проходит под радиационными поясами, вблизи экватора орбита пересекает внутренний РПЗ, вблизи апогея орбита пересекает область внешнего РПЗ. Третий этап – с помощью разгонного блока, вывод КА с промежуточной орбиты на межпланетную траекторию (см. рис. 1) . В течение последних двух этапов, это около 6 часов, КА подвергается интенсивному воздействию высокоэнергичных частиц внутреннего и внешнего РПЗ, воздействию частиц СКЛ и ГКЛ.

Рис.1. Схематично показаны этапы вывода космического аппарата на межпланетную траекторию [4].

2.2 Оценка поглощенной дозы радиации за период пересечения КА радиационных поясов при низкой интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ

Зная параметры орбиты, определим магнитную L – оболочку (L – параметр Мак-Ивлина) в области апогея. Получим, что апогей, данной промежуточной орбиты, находится в области L ≈ 7,6. Заметим, что орбита геостационарного спутника находится на магнитной оболочке L ≈ 6,6, т.е. в области экватора более чем на 6000 км ближе к Земле, чем магнитная оболочка, которая находится в области апогея промежуточной орбиты. Следовательно, космический аппарат, находясь на промежуточной орбите, пересекает магнитные оболочки, почти всего РПЗ, включая и магнитную оболочку на которой находятся геостационарные спутники. Следовательно, прогноз динамики потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите можно использовать и для прогноза изменений радиационных условий на промежуточной орбите, связанных с изменениями интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ.

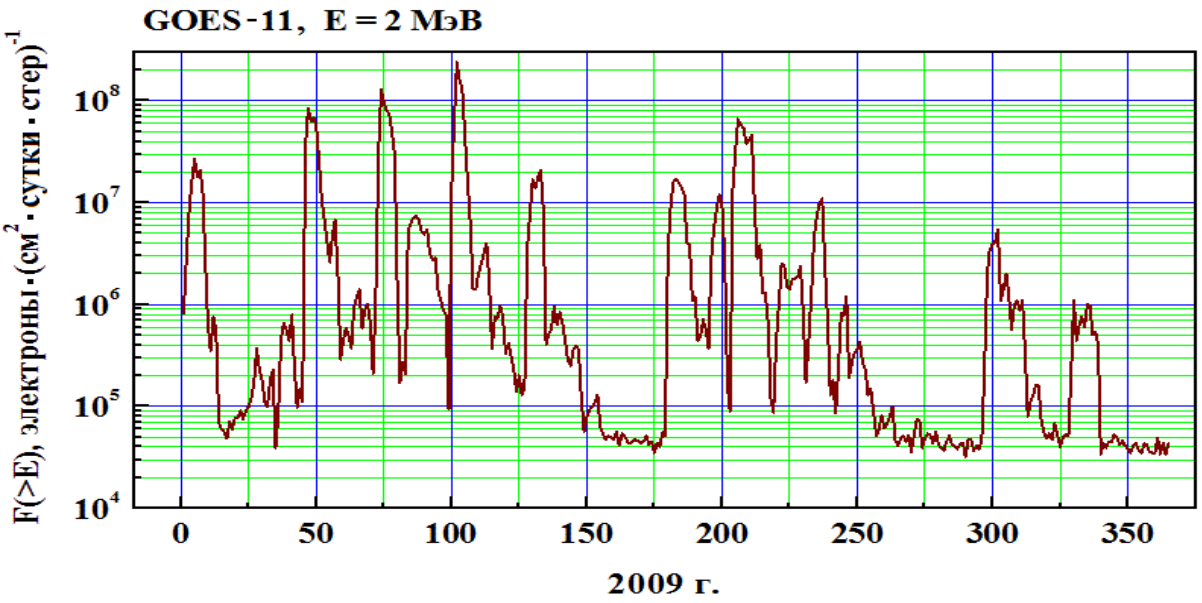

Рис.2. Изменение со временем интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите, за период с 1 января по 31 декабря 2009 г, по данным космического аппарата GOES. Среднее значение интенсивности потока релятивистских электронов в 2009 году на геостационарной орбите около $6{,}765 \cdot 10^6$ электронов / (см^2 · сутки · стер).

На рис.2 приведены данные измерений интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите. На рисунке видно, что во внешнем радиационном поясе бывают возрастания интенсивности потоков релятивистских электронов, продолжительностью от нескольких дней до нескольких десятков дней.

При полетах за пределы магнитосферы Земли КА пересекает внутренний и внешний РПЗ. Во внутреннем радиационном поясе потоки высокоэнергичных протонов, со временем, меняются в небольших пределах. В первом приближении, изменениями уровня радиации во внутреннем поясе можно пренебречь. Во внешнем поясе потоки релятивистских электронов со временем меняются в десятки, а в некоторых случаях и в сотни раз. При полетах за пределы магнитосферы Земли, полная доза радиации складывается из почти постоянной составляющей дозы радиации внутреннего пояса и переменной составляющей дозы радиации внешнего пояса.

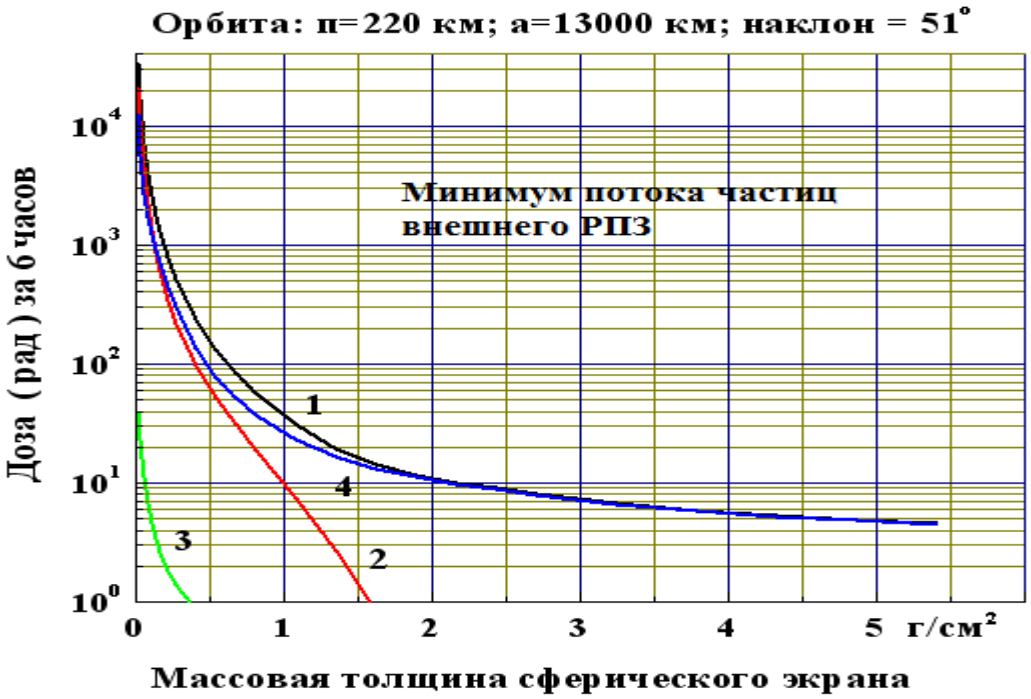

Рис.3. Поглощенная доза радиации при выводе КА за пределы магнитосферы Земли, в период низких потоков релятивистских электронов с E > 2 МэВ внешнего РПЗ: 1 – суммарная доза радиации от всех частиц РПЗ; 2 – от электронов (в основном) внешнего РПЗ; 3 – от тормозного излучения электронов; 4- от протонов внутреннего РПЗ.

На рис. 3 показана оценка поглощенной дозы радиации на промежуточной орбите КА в периоды низких потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ. В такие периоды, на геостационарной орбите ожидаются потоки электронов с E > 2 МэВ, как правило, не более 150 частиц /(см^2 • с). На рис.2, это соответствует интенсивности потока электронов не более 10^6 электронов /(см^2 · сутки · стер). В этом случае, за защитным экраном массовой толщиной более 1 г/см^2, вся поглощенная доза радиации от частиц РПЗ, будет обусловлена потоками протонов внутреннего РПЗ с кинетической энергий более 30 МэВ.

2.3 Свойства межпланетной среды

Межпланетная среда. Все планеты солнечной системы находятся внутри магнитосферы Солнца (гелиомагнитосферы), т. е. в области занятой магнитным полем Солнца, напряженность которого на орбите Земли составляет величину в среднем около 5γ (1γ = 10^{-5} Гс = 10^{-9} Тл), в то время как магнитное поле на полюсе Солнца составляет величину от 1 до 2 Гс. Заметим, что локально, в области солнечных пятен, магнитное поле может достигать величины в несколько тысяч гаусс.

Межпланетная среда представляет собой плазму солнечного ветра с крупномасштабным **межпланетным магнитным полем (ММП)**, имеющим

спиральную структуру. Из-за высокой проводимости, плазма перемещается вместе с магнитным полем. Крупномасштабное магнитное поле делает возможным существование в межпланетной среде магнитозвуковых и альфвеновских волн, влияющих на динамику межпланетной среды и космических лучей.

На рис. 4 показана упрощенная модель силовых линий межпланетного магнитного поля в плоскости солнечного экватора при идеально спокойном солнечном ветре. Идеально спокойный солнечный ветер – это абстракция, реально он обычно всегда возмущен в той или другой степени.

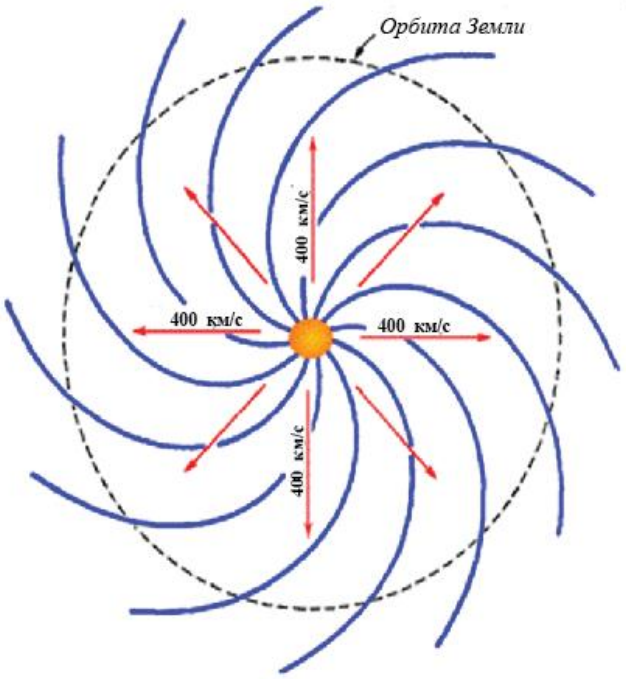

Рис.4. Силовые линии спокойного межпланетного магнитного поля возникли в результате вытягивания силовых линий магнитного общего поля Солнца идеализированным спокойным солнечным ветром, распространяющимся радиально от Солнца со средней скоростью около 400 км/с.

Наблюдаемый диапазон изменения скоростей плазмы солнечного ветра на орбите Земли от 250 км/с, при низкой солнечной активности, и до нескольких тысяч километров в секунду при высокой солнечной активности. Солнечный ветер представляет собой поток плазмы, двигающейся почти радиально (рис. 4) от Солнца со скоростью превышающей скорость звука и альфвеновскую скорость в несколько раз. Причиной существования солнечного ветра является отсутствие вблизи поверхности Солнца термодинамического и механического равновесия

плазмы из-за ее перегрева. Динамика солнечного ветра зависит от температуры солнечной короны. Для описания движения плазмы солнечного ветра в межпланетном пространстве можно использовать одно из основных уравнений магнитной гидродинамики, уравнение индукции [5] :

где **u** – вектор скорости движения вещества; $\eta = (4\pi\mu\sigma)^{-1}$ – коэффициент диффузии магнитного поля в среде, он определяет как быстро магнитное поле просачивается через вещество от точки к точке; μ – магнитная проницаемость ($\mu = 1$ поскольку среда не намагничена); σ – электропроводность среды . В межпланетной среде из-за высокой электропроводности плазмы ($(1/\sigma) \sim 0$) можно считать, что $\eta \sim 0$, и представить исходное уравнение в виде:

Это уравнение тождественно уравнению для вихря скорости в гидродинамике невязкой жидкости и означает, что линии вихря движутся вместе с жидкостью. В магнитной гидродинамики это уравнение описывает изменение магнитного поля так, как будто магнитные силовые линии поля жестко связаны веществом. По терминологии Альфвена, магнитное поле как бы «вморожено» в плазму солнечного ветра. Движение плазмы вдоль силовых линий не оказывает никакого действия на поле, но движение плазмы поперек силовых линий поля увлекает за собой магнитное поле и перемещается вместе с ним как одно целое. Знание проводимости межпланетной среды необходимо для анализа взаимодействия плазмы и ММП, но обратим внимание на то, что в космической магнитной гидродинамике, из-за гигантских размеров проводников, также важнейшую роль играет и индуктивность.

Некоторые усредненные количественные характеристики потока плазмы солнечного ветра и ММП на орбите Земли [2]:

– плотность частиц плазмы одного знака $n \approx 7$ см^3;
– средняя направленная скорость плазмы $u \approx 400$ км/с;
- поток массы $J_M \approx 5{,}8 \cdot 10^{-16}$ г $\cdot$см$^{-2}$ $\cdot$ с$^{-1}$;
- поток кинетической энергии $J_{EK} \approx 0{,}6$ эрг$\cdot$см$^{-2}\cdot$ с$^{-1}$;
- поток тепловой энергии $J_{ET} \approx 0{,}02$ эрг$\cdot$см$^{-2}\cdot$ с$^{-1}$;
- поток магнитной энергии $J_{EM} \approx 0{,}01$ эрг$\cdot$см$^{-2}\cdot$ с$^{-1}$;
– температура протонов плазмы $T_p \approx 9 \cdot 10^4$ К;
– температура электронов плазмы $T_e \approx 1{,}5 \cdot 10^5$ К;
– поток частиц солнечного ветра $nu \approx 2{,}8 \cdot 10^8$ см$^{-2}$ $\cdot$ с$^{-1}$;
– плотность энергии протонов $nm_pu^2/2 \approx 0{,}94\cdot10^{-8}$ эрг$\cdot$см$^{-3}$;
– плотность тепловой энергии $3nkT_p/2 \approx 1{,}3\cdot10^{-10}$ эрг$\cdot$см$^{-3}$;
–альфвеновская скорость $V_A = (B^2 / 4\pi nm_p)^{1/2} \approx$ 41 км/с;
- скорость звука $Vз = ((C_p / C_v)kT/m)^{1/2} \approx 60$ км/с;

- давление протонов $P_P = nk(T_p) \approx 0,\ 87\ 10^{-10}$ дин/см^2 = 8,7 пикопаскалей (pPa);
- давление плазмы $P_{ГАЗ} = nk(T_p + T_e) \approx 2,5 \cdot 10^{-10}$ дин/см^2 =25 pPa;
– напряженность межпланетного магнитного поля $B \approx 5 \cdot 10^{-5}$ *Гс*= $5 \cdot 10^{-9}$ *тесла (Т);*
- магнитное давление $P_M = B^2/8\pi \approx 9,95$ pPa;
– отношение давления протонов к магнитному давлению $\beta_p = 8\pi nkT_p / B^2 \approx 0,87$;
– электронная плазменная частота $\omega_0 = (4\pi ne^2 / m_e)^{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^5$ с$^{-1}$;
– циклотронная частота электронов $\omega_{ce} = (eB/m_e c) \approx 0,9 \cdot 10^3$ с$^{-1}$;
– циклотронная частота протонов $\omega_{cp} = (eB / m_p c) \approx 0,5$ с$^{-1}$;
– верхняя гибридная частота $\omega_{h1} = (\omega_0^2 + \omega_{ce}^2)^{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^5$ с$^{-1}$;
– нижняя гибридная частота $\omega_{h2} = (\omega_{cp}\omega_{ce})^{1/2} \approx 21$ с$^{-1}$;
– тепловая скорость электронов $V_e = (2kT_e/m_e)^{1/2} \approx 2,1 \cdot 10^8$ см/с;
– тепловая скорость протонов $V_p = (2kT_p/m_p)^{1/2} \approx 3,9 \cdot 10^6$ см/с;
– ларморовский радиус электронов $r_e = V_e / \omega_{ce} \approx 2,3 \cdot 10^5$ см;
– ларморовский радиус протонов $r_p = V_p / \omega_{cp} \approx 8 \cdot 10^6$ см;
– дебаевский радиус $r_d = (kT_e/4\pi ne^2)^{1/2} \approx 10^3$ см,
где k –постоянная Больцмана, равна $1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К.

Имеются существенные различия между рекуррентными (повторяющимися) и вспышечными высокоскоростными потоками плазмы солнечного ветра. Продолжительность вспышечного потока (время, в течении которого Земля находится внутри потока) около полутора суток. Продолжительность рекуррентных высокоскоростных потоков находится, в основном, в пределах от 6 до 14 суток. Источником вспышечных потоков солнечной плазмы являются солнечные вспышки. Источником рекуррентных потоков являются корональные дыры на Солнце. Вспышечные потоки, подобно магнитному поршню, вытесняют на периферию солнечной системы пыль, частицы вещества атмосфер планет и даже частицы космических лучей. В отличии от вспышечных потоков внутри рекуррентного высокоскоростного потока образуется область с регулярным магнитным полем, которая для частиц космических лучей (ГКЛ и релятивистских электронов в частности) представляет собой канал, по которому частицы космических лучей могут легко проходить с периферии солнечной системы в ее центральные области. Радиационные пояса Юпитера являются мощным источником релятивистских электронов в солнечной системе. Когда Земля и Юпитер одновременно попадают в один и тот же рекуррентный высокоскоростной поток солнечного ветра, вблизи магнитосферы Земли наблюдается возрастание интенсивности юпитерианских релятивистских электронов [2], см. рис. 5.

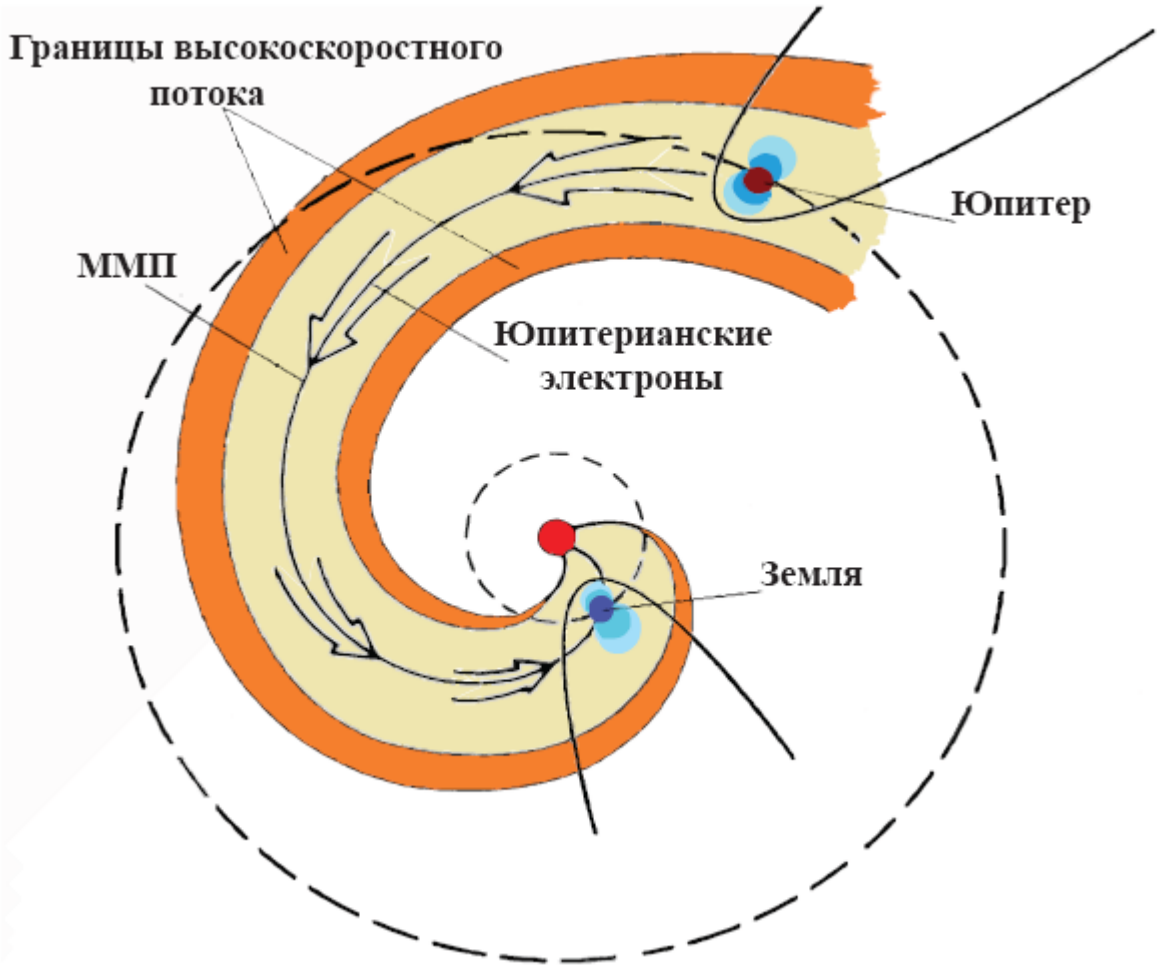

Рис.5. Схема проникновения энергичных юпитерианских электронов в окрестность Земли, в период, когда Земля и Юпитер находятся на одной силовой линии ММП и когда ММП «разглажено» рекуррентным высокоскоростным потоком плазмы солнечного ветра [2].

Магнитогидродинамические волны в солнечном ветре. Поскольку проводимость плазмы солнечного ветра достаточно велика, то можно считать ММП «вмороженным» в плазму. Если возникнет возмущение в плазме солнечного ветра, например, некоторый первоначальный объем плазмы, сместится поперек силовых линий поля, то он потянет за собой и «вмороженное» в этот объем магнитное поле. Изменение конфигурации магнитного поля приведет к возникновению системы индукционных токов, которая взаимодействуя с существующим магнитным полем, передаст начальное движение плазмы соседним участкам. Объем плазмы, который начал движение первым, остановится, но придут в движение соседние участки плазмы. Таким образом, возникнет волна, которая будет распространяться вдоль силовой линии магнитного поля.

К этому выводу можно прийти исходя из других рассуждений. Силовые линии магнитного поля можно рассматривать как некие натянутые струны, где максвелловы натяжения силовых линий поля заменят упругость среды, а масса плазмы, «намороженная» на силовую линию, придаст инерцию силовой линии магнитного поля. Таким образом, мы получаем почти полный аналог обычной струны.

Следовательно, аналогично с теорией колебания натянутой струны, можно ожидать, что при воздействии на силовую линию поля возникнет поперечная (альфвеновская) волна, распространяющаяся вдоль поля со скоростью $V_A = (B^2/4\pi\rho)^{1/2}$, где $\rho = nm_p$.

Такие возмущения магнитного поля, представляющие собой поперечные колебания силовых линий поля, распространяющиеся вдоль магнитного поля, относятся к типу **магнитогидродинамических (МГД)** волн. К волнам МГД, кроме альфвеновских волн, относятся также магнитозвуковые и звуковые волны в плазме с магнитным полем.

Магнитозвуковая волна отличается от альфвеновской волны тем, что является продольной волной (в гидродинамическом смысле) и распространяется поперек магнитного поля. Звуковая волна, также как магнитозвуковая волна, является продольной волной, но распространяется вдоль магнитного поля. Заметим, что альфвеновские волны в отличие от магнитозвуковых волн не связаны с изменением плотности среды и представляют собой частный случай низкочастотной электромагнитной волны, распространяющейся в магнитном поле.

Возникновение волн в плазме с магнитным полем обычно связывают с различными типами неустойчивости. Если существует хотя бы один тип малых возмущений, которые раз возникнув, усиливаются, то плазма относительно такого типа возмущения считается не устойчивой. Например, кинетическая неустойчивость плазмы, в результате которой изменяется функция распределения скоростей частиц плазмы. При наличии электрического поля небольшая часть электронов (наиболее быстрых, для которых длина свободного пробега достаточно велика) будут приобретать энергию большую, чем они теряют из-за сопротивления. В результате этого электроны будут ускоряться до тех пор, пока не выйдут из области ускорения или пока не начнут действовать другие более эффективные механизмы торможения. Другим видом кинетической неустойчивости является пучковая неустойчивость, возникающая при движении пучка быстрых частиц плазмы. Заряженные частицы (электроны), движущиеся в плазме со скоростями больше скорости теплового движения частиц плазмы, возбуждают продольные плазменные волны. Если таких частиц много и они хаотически распределены в плазме, то волны, излучаемые отдельными частицами, не когерентны, и их энергии излучения просто складываются. Такой тип излучения называется тепловым. Нетепловой тип генерации волн возникает тогда, когда функция распределения скоростей частиц плазмы отличается от максвелловой, например, если имеется пучок быстрых заряженных частиц и средняя

скорость пучка частиц много больше дисперсии скоростей в плазме и в пучке.

Турбулентность плазмы солнечного ветра. Наличие магнитного поля в межпланетной среде оказывает некоторое стабилизирующее действие и тормозит развитие возмущений, и тем самым увеличивает устойчивость движения плазмы солнечного ветра. Действительно, всякое хаотическое движение плазмы, приводящее к искривлению и запутыванию силовых линий магнитного поля, будет встречать противодействие со стороны поля из-за упругости силовых линий. И это противодействие будет тем больше, чем больше энергия магнитного поля по сравнению с кинетической энергией движения плазмы. Обычно хаотическое движение плазмы охватывает целый спектр пространственных масштабов. Такое движение называется турбулентным. Для турбулентности характерно движение энергии от больших пространственных масштабов к меньшим масштабам. Самые мелкие пульсации плазмы затухают из-за вязкости. Таким образом, первоначальная энергия возмущения, каких бы больших масштабов она не была, в конечном итоге переходит в тепло.
Межпланетное магнитное поле увеличивает устойчивость движения плазмы солнечного ветра и тем самым препятствует возникновению турбулентности и затрудняет перенос энергии в уже существующей турбулентности от движения больших масштабов к движению меньшим масштабам, так как этот перенос энергии всегда осуществляется за счет неустойчивости, а магнитное поле препятствует развитию неустойчивости. Но поскольку энергия магнитного поля в межпланетной среде, в основном, меньше кинетической энергии плазмы, то межпланетное магнитное поле способно лишь несколько замедлить процесс развития неустойчивости и, тем самым, лишь немного замедлить процесс диссипации энергии крупномасштабных движений в солнечном ветре.

Магнитогидродинамические разрывы в солнечном ветре. При движении плазмы могут возникать разрывы непрерывности в термодинамических параметрах и в параметрах движения. Разрыв разделяет две среды с различными параметрами. В обычной газодинамике (в отсутствии магнитного поля) все виды разрывов можно свести к двум группам, не связанным между собой: тангенциальные разрывы и ударные волны. Тангенциальные разрывы в отсутствии магнитного поля являются неустойчивыми и характеризуются тем, что через них не проходит поток вещества, они движутся вместе со средой. В тангенциальных разрывах передается только касательная составляющая импульса от одной среды к другой. В ударных волнах всегда есть поток вещества через разрыв, и по этой причине, они всегда движутся относительно среды. В ударных волнах передается только нормальная составляющая импульса по отношению к

плоскости разрыва. По этой причине не возможен переход ударных волн в тангенциальные разрывы и наоборот.

В межпланетной среде из-за существования ММП, кроме тангенциальных разрывов и перпендикулярных ударных волн может существовать новый тип крупномасштабного возмущения состояния среды – это наклонные ударные волны. Перпендикулярные ударные волны – это ударные волны, у которых плоскость фронта волны параллельна ММП или, что то же самое, нормаль к фронту волны перпендикулярна ММП. Наклонные ударные волны – это ударные волны распространяющиеся под некоторым углом к ММП, таким, что их нельзя считать ни продольными, ни поперечными. В отличие от тангенциальных разрывов и перпендикулярных ударных волн в наклонных ударных волнах из-за глобального магнитного поля, имеет место одновременная передача как нормальной, так и тангенциальной составляющей импульса от одной среды к другой. Наклонная ударная волна ведет себя одновременно как тангенциальный разрыв и как обычная ударная волна.

Ударные волны в межпланетной среде. Наиболее мощными источниками возмущений солнечного ветра являются высокоскоростные потоки, вытекающие из активных областей и корональных дыр на Солнце [6], а также хромосферные вспышки, приводящие к выбросу в межпланетную среду ускоренной плазмы и генерации ударных волн [7- 9]. Вблизи орбиты Земли наблюдаются оба источника магнитогидродинамических возмущений солнечного ветра.

Используя терминологию Е.Н. Паркера [8], можно сказать, что межпланетная ударная волна подобно метле, выметает из солнечной системы газы, истекающие из планет и комет, мелкие частицы метеорной пыли и даже частицы галактических космических лучей [10, 11]. Межпланетные ударные волны оказывают влияние на динамику внешних областей радиационных поясов Земли, вызывают геомагнитные бури и полярные сияния, порождают процессы ускорения частиц в межпланетной среде и магнитосферах планет. Скорости межпланетных ударных волн за период наблюдения с 1947 по 2009 гг., в основном, находились в диапазоне от 400 до 600 км/с. Но были события, такие как 4 августа 1972 г., когда скорость ударной волны достигала рекордной величины и была более 1500 км/с [12].

В событии 4 августа 1972 г. наблюдалось система из двух ударных волн. Первая ударная волна двигалась со скоростью 600 км/с, вторая ударная волна, догоняя первую, двигалась со скоростью более 1500 км/с. Система сближающихся ударных волн образовала в межпланетном пространстве магнитную ловушку. Возникшая в межпланетном пространстве магнитная ловушка содержала высокоэнергичную плазму и частицы, ускоренные еще в солнечной вспышке. В результате сближения ударных волн произошло сжатие плазмы в магнитной ловушке и ускорение (или до ускорение) в ней частиц до энергий порядка миллиарда электрон вольт. Доза радиации от

потоков этих заряженных частиц внутри КА «Прогноз» [13, 14] за период с 4 по 12 августа 1972 г. составила величину около 123 рад, а снаружи КА – около 1000 рад. Как правило, взаимодействие ударной волны с магнитосферой Земли сопровождается мощными геомагнитными бурями и усилением процессов ускорения заряженных частиц и процессов сброса частиц из радиационных поясов Земли в ионосферу. При этом воздействие потоков высокоэнергичных частиц космических лучей на верхнюю атмосферу способно изменить состояние атмосферы Земли [15, 16].

Межпланетное магнитное поле практически всегда находится в состоянии возмущения, особенно вблизи ударных волн [17-19]. В периоды высокой возмущенности межпланетного магнитного поля вариации космических лучей наблюдались даже и по данным наземных станций [20]. Детальное исследование магнитной турбулентности вблизи межпланетных ударных волн впервые было выполнено по данным **автоматических межпланетных станций (АМС)** «Венера-13» и «Венера-14» [21-24]. В результате этих исследований было установлено, что магнитное поле спокойного солнечного ветра структурировано с характерным масштабом около 0,04 а.е. (на рис. 6, это около 4 часов). Для оценки этого среднего пространственного масштаба неоднородности ММП использовались данные двух АМС «Венера», полученные за период около 300 часов.

Наблюдаемые квазипериодические изменения мощности флуктуаций ММП связаны с коротирующими (вращающимися вместе с Солнцем) стационарными магнитогидродинамическими разрывами, разделяющими отдельные силовые трубки ММП. Таким образом, оказалось, что неоднородности в межпланетной среде расположены не равномерно, а группируются вблизи «стенок» (стационарных МГД разрывов), вытянутых по спирали от Солнца на периферию и участвующих в коротации.

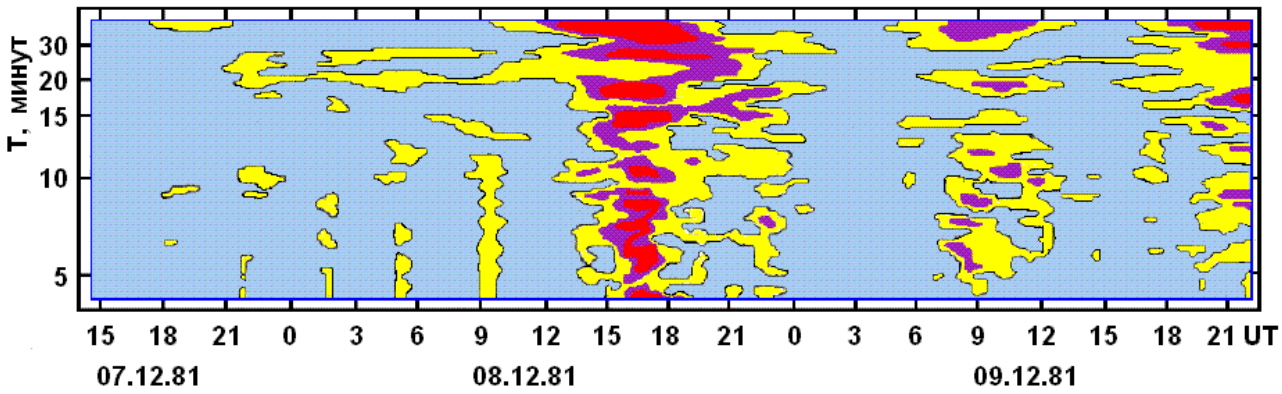

Рис. 6. Фронт межпланетной ударной волны наблюдался на АМС «Венера-13» 08.12.1981 г. в 13 ч. 42 мин. [2, 19].

В системе отсчета квазиперпендикулярных (почти перпендикулярных) межпланетных ударных волн, должно наблюдаться непрерывное

натекание на фронт ударной волны полупрозрачных (для заряженных частиц) «стеночек» с повышенной мощностью флуктуаций ММП, что приведет к ускорению некоторой части заряженных частиц, захваченных между очередной «стеночкой» и фронтом волны (см. [25-27]). Для выявления динамики низкочастотной МГД турбулентности вблизи фронта ударной волны в солнечном ветре использовались данные прямых измерений ММП на АМС «Венера-13».

Усиление МГД турбулентности перед фронтами ударных волн. Известно из газодинамики, что ударные волны могут модифицировать среду перед фронтом волны. Действительно часть энергии, которая расходуется на сжатие среды в области ударного слоя волны, идет на ионизацию газа в этом слое. При этом область сжатого газа ударной волны излучает как черное тело. Вычислив температуру в области ударного слоя волны и используя формулу Стефана-Больцмана, можно оценить поток электромагнитного излучения перед фронтом волны. Сильная газодинамическая ударная волна способна своим электромагнитным излучением прогревать (модифицировать) среду перед ударным фронтом и двигаться по среде с уже измененными свойствами.

Ударные волны, генерирующие электромагнитное излучение в космических условиях, могут наблюдаться, например, при мощных солнечных вспышках и при вспышках сверхновых.

Но из-за наличия магнитного поля в межзвездном и в межпланетном пространстве наиболее важную роль в диссипации энергии ударных волн и в модификации среды перед фронтами ударных волн играет не электромагнитное излучение, а потоки заряженных частиц космических лучей, ускоренных на фронтах этих волн [27].

На рис. 6. видно, что максимальная мощность флуктуаций ММП наблюдается в области сжатого солнечного ветра, в ударном слое межпланетной ударной волны (красный цвет), где мощность флуктуаций ММП примерно в 100 раз превосходит мощность флуктуаций в спокойном солнечном ветре (синий цвет). Спектральная плотность мощности флуктуаций в ударном слое в области сжатой плазмы солнечного ветра на частоте 10^{-3} Гц достигала величины 10^4 γ^2/Гц. За ударным слоем в области разряженной плазмы наблюдается резкое падение мощности флуктуаций ММП до уровня спокойного солнечного ветра. В спокойном солнечном ветре на тех же частотах мощность флуктуаций ММП имела величины порядка 10^2 γ^2/Гц. Перед фронтом ударной волны хорошо видна структура (рис.6), представляющая собой периодическое усиление мощности флуктуаций ММП. Эти периодические усиления мощности флуктуаций ММП совпадают с МГД разрывами, разделяющими отдельные силовые трубки ММП. При приближении к фронту ударной волны степень возмущенности магнитного поля в этих структурах возрастает. Между фронтом ударной волны и постоянно натекающими на фронт ударной волны магнитными неоднородностями, с повышенным уровнем флуктуаций

ММП, создаются условия для захвата и регулярного ускорения заряженных частиц [25]. Ускорение заряженных частиц происходит за счет кинетической энергии фронта ударной волны. Часть энергии, полученной от фронта ударной волны, быстрые заряженные частицы расходуют на модификацию среды в области перед ударным фронтом, конкретно, на усиление мощности флуктуаций ММП в диапазоне альфвеновских частот. Передача кинетической энергии от такой крупномасштабного структуры в солнечном ветре, как межпланетная ударная волна, к среде перед фронтом ударной волны, происходит через быстрые заряженные частицы космических лучей. И так, по современным представлениям повышенная мощность флуктуаций ММП в диапазоне альфвеновских частот, перед фронтом межпланетной ударной волны, связана с повышенным потоком космических лучей перед фронтом ударной волны [27].

Событие 8 декабря 1981 г. не является исключением, и разумно предположить, что усиление турбулентности магнитного поля в диапазоне частот альфвеновских волн от 10^{-2} до 10^{-3} Гц перед фронтом ударной волны (рис. 6), вызвано повышенным потоком частиц космических лучей.

Изменение состояния среды за фронтом ударной волны. Поскольку характерные размеры крупномасштабных возмущений в плазме солнечного ветра много больше длины свободного пробега частиц плазмы, то солнечный ветер можно считать сплошной средой, и к нему применим математический аппарат, разработанный для физики сплошных сред. Электропроводимость солнечного ветра близка к проводимости металлов. Эта электропроводящая среда движется в межпланетном магнитном поле, плотность энергии которого может быть сравнима с плотность энергии плазмы солнечного ветра. Следовательно, для строгих математических расчетов необходимо использовать уравнения магнитной гидродинамики. Важным параметром сплошной среды является скорость звука $u_{зв}$, равная корню квадратному из произведения показателя адиабаты $\gamma = 5/3$ на отношение давления P к плотности газа ρ. Звуковая волна – это возмущение малой амплитуды, распространяющаяся в сплошной среде, ударная волна – это возмущение большой амплитуды, распространяющаяся в сплошной среде, и то и другое являются возмущением среды, но свойства их различны. Межпланетная ударные волна это крупномасштабное возмущение, состоящее как бы из двух волн: передний фронт перед ударным слоем представляет волну сжатия, за ударным слоем располагается волна разряжения. Волна сжатия движется со скоростью больше скорости звука в спокойном солнечном ветре и меньше скорости звука в ударном слое. Волна разряжения движется со скоростью равной или меньше скорости звука в спокойном солнечном ветре. Поскольку волна сжатия плазмы всегда движется быстрее волны разряжения, то ударный слой, расположенный между ними, постоянно увеличивается. В ударном слое из-за сжатия плазмы будет наблюдаться резкое увеличение температуры. Процесс сжатия плазмы, ее нагрев в ударном слое и охлаждение за ударным

слоем в волне разряжения необратим. В разряженной плазме за ударной волной температура ниже, чем в ударном слое, но выше, чем в спокойном солнечном ветре. Существенное отличие ударных волн от звуковых волн состоит в том, что ударные волны нагревают среду, по которой проходят.

Ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. Различные возможности статистического ускорения частиц вблизи фронтов межпланетных ударных волн (МУВ) были показаны многими исследователями, но наиболее эффективным является регулярный механизме ускорения Г.Ф.Крымского [25]. Рассмотрим идеализированную задачу об ускорении частиц ударной волной плоской геометрии, распространяющейся в среде, где существуют периодические структуры в магнитном поле («стеночки» на рис. 6) с повышенным уровнем мощности МГД турбулентности в диапазоне альфвеновских частот. Частицы космических лучей, двигаясь от фронта ударной волны «вверх по потоку», отражаются от этих магнитных неоднородностей и возвращаются обратно к фронту, при этом получая очередную порцию дополнительной энергии. Отражаясь от фронта ударной волны, частицы вновь уходят «вверх по потоку», и так происходит до тех пор, пока они не наберут достаточную энергию для «убегания» из области ускорения. Для частиц космических лучей периодические структуры, показанные на рис. 6, представляют собой полупрозрачные «зеркала», в то время как фронт ударной волны можно считать для космических лучей почти не прозрачным «зеркалом». В системе отсчета расположенной на фронте ударной волны эти полупрозрачные для частиц космических лучей «зеркала», непрерывно двигаются к фронту ударной волны. Таким образом, перед фронтом ударной волны образуется область, в которой частицы космических лучей эффективно удерживаются, и ускоряются при каждом взаимодействии с магнитными неоднородностями, двигающимися по направлению к фронту ударной волны. Ускоренные частицы космических лучей усиливают турбулентность магнитного поля перед фронтом волны. Усиление магнитной турбулентности в диапазоне альфвеновских волн перед фронтом ударной волны неизбежно влечет за собой повышение эффективности ускорения космических лучей. Ускорение космических лучей и генерация альфвеновских волн перед фронтом межпланетной ударной волны – это два процесса, взаимно поддерживающих друг друга [27].

Экспериментальные данных о потоках частиц СКЛ в событии 7.12.81 г. мы здесь не приводим, ввиду их отсутствия у нас. Имеются аналогичные данные по потокам частиц СКЛ 7.12.82 г, опубликованные в работе [28], мы их здесь и приведем. Эти экспериментальные данные получены на АМС «Венера -13 » и «Венера -14». Протонная вспышка (1В/Х2) произошла в 23.36 UT 07.12.1982 г. на западном лимбе Солнца в области с координатами S19 W86. АМС «Венера-13» и «Венера-14» находились на расстоянии d ≈ 0,8 а.е. от Солнца, на 47 градусов западнее линии Солнца - Земля. На рис. 7 показан временной профиль интенсивности потоков СКЛ

от вспышки по данным АМС «Венера-13». Временной профиль интенсивности частиц СКЛ до прихода МУВ обусловлен их диффузионным распространением в невозмущенном солнечном ветре, преимущественно вдоль ММП. После 06.00 UT 09.12.1985 г. профиль интенсивности потока СКЛ существенно изменился.

Фронт ударной волны от вспышки (1В/Х2) 07.12.82 был зарегистрирован 11.00 UT 09.12.1982 г. по увеличению напряженности ММП, изменением всех трех его компонент по данным АМС «Венера-14». И резким спадом интенсивности потоков СКЛ по данным обоих АМС. Перед фронтом ударной волны наблюдается увеличение интенсивности потока СКЛ, которое указывает на ускорение заряженных частиц перед фронтом.

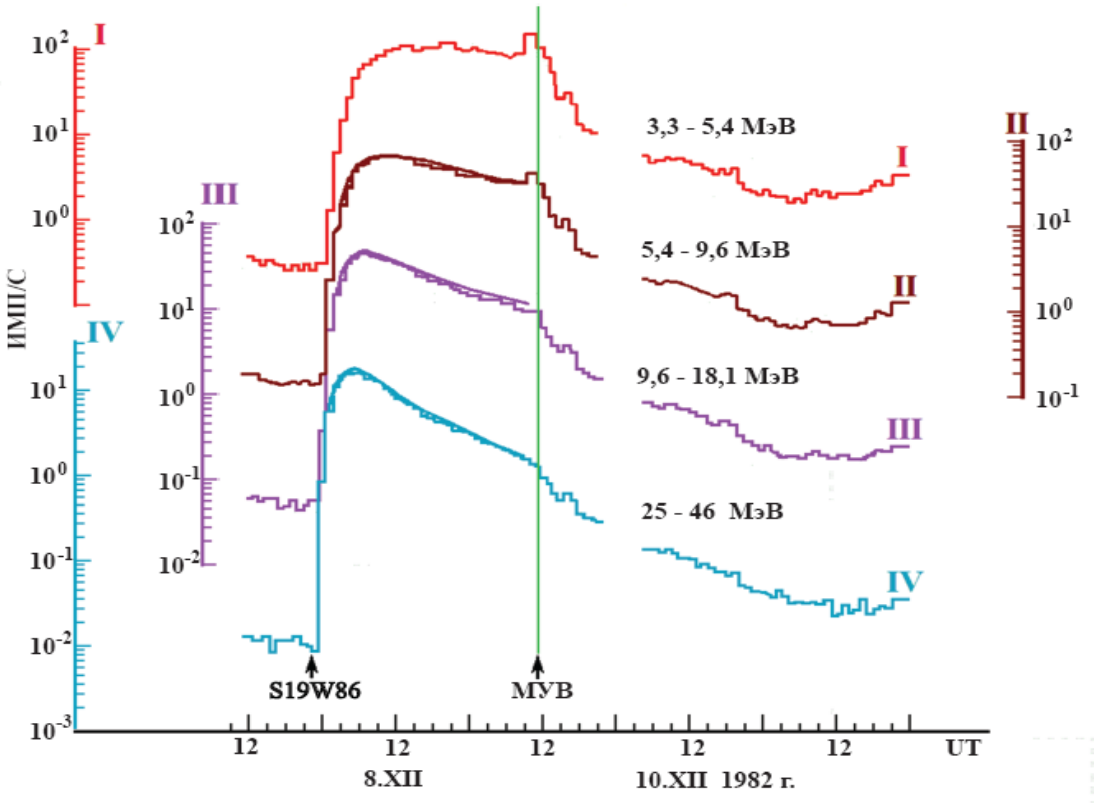

Рис. 7. Интенсивность потоков (в относительных единицах) солнечных космических лучей, зарегистрированных на АМС «Венера-13» от солнечной вспышки 7.12.1982 г. [2, 28].

2.4 Энергетические спектры, химический состав и проникающая способность частиц ГКЛ

Ожидаемый дифференциальные спектры частиц ГКЛ в области высоких энергий. Дифференциальный спектр схематично можно представить в виде показанном на рис. 8 (красная линия). Перелом спектра в области 10^6 ГэВ в литературе часто называют коленом.

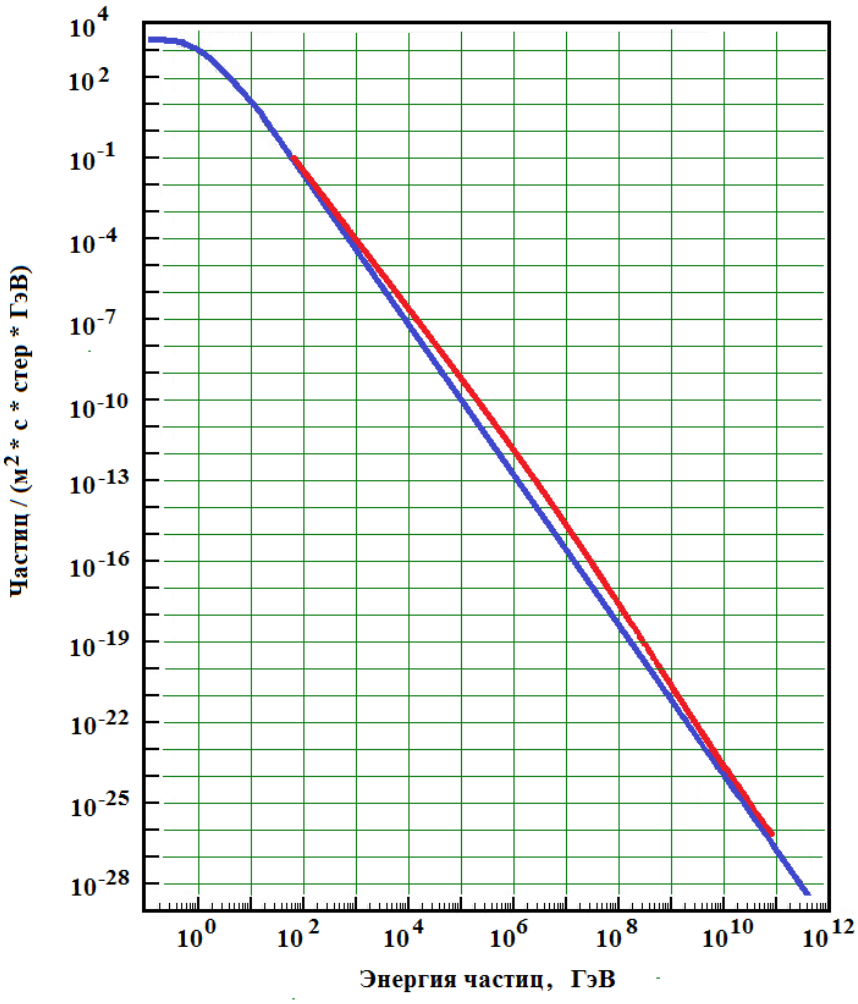

Рис. 8. Ожидаемый дифференциальный спектр частиц ГКЛ в области высоких энергий (красная линия). Синяя линия представляет собой некую кривую, к которой стремится спектр частиц в области энергий меньше 10^6 и в области больше 10^6 ГэВ.

Ожидаемые интегральные энергетические спектры частиц ГКЛ в области высоких энергий. Показатель интегрального спектра γ для протонов галактических космических лучей (ГКЛ) в различных диапазонах энергий частиц имеет значения [29, 30] :

- γ=1,7 при 10 ГэВ < E < 10^6 ГэВ;
- γ=2,0 при 10^6 ГэВ < E < 10^{10} ГэВ;
- γ=1,31 при E > 10^{10} ГэВ.

Ожидаемые интегральные потоки различных типов частиц ГКЛ в околоземном космическом пространстве в диапазоне энергий от 10 миллиардов эВ до 10^{15} эВ аппроксимируем простыми функциями. В полярных областях магнитосферы, где можно не учитывать влияние магнитного поля на частиц ГКЛ с энергией более 10 ГэВ, зависимость интенсивности интегральных потоков этих частиц от энергии (в единицах ГэВ/нуклон) в первом приближении представим как поток за один час в виде:

$F(>E) = 3{,}60 \cdot 10^{+07} \cdot E^{-1,7}$ протонов / (м^2 • час • стер) ;
$F(>E) = 3{,}50 \cdot 10^{+02} \cdot E^{-1,7}$ антипротонов / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 2{,}60 \cdot 10^{+06} \cdot E^{-1,7}$ (ядра гелия) / (м^2 • час • стер) ;
$F(>E) = 3{,}10 \cdot 10^{+05} \cdot E^{-1,7}$ (ядра Z≥ 3) / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 2{,}60 \cdot 10^{+05} \cdot E^{-1,7}$ (ядра Z≥ 6) / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 6{,}84 \cdot 10^{+04} \cdot E^{-1,7}$ (ядра Z≥ 10) / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 1{,}44 \cdot 10^{+04} \cdot E^{-1,7}$ (ядра Z≥ 20) / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 0{,}36 \cdot 10^{+01} \cdot E^{-1,7}$ (ядра Z≥ 30) / (м^2 • час • стер).

В этом описании интегральных потоков частиц ГКЛ не учитывается, что доля тяжелых ядер с ростом энергии может быстро увеличиваться.

Вполне возможно, что при сверхвысоких энергиях ГКЛ в основном состоят из тяжелых ядер. В работе [31 показано, что вблизи нейтронной звезды протон не может быть ускорен до энергии более 10^9 ГэВ, но такое ограничения на тяжелые ядра не распространяется. Если источниками частиц сверхвысоких энергий являются нейтронные звезды, то вероятно, что эти частицы представляют собой не протоны, а тяжелые ядра.

Ожидаемые интегральные спектры электронов и позитронов ГКЛ можно представить в виде:

$F(>E) = 5{,}40 \cdot 10^{+05} \cdot E^{-2,0}$ электронов / (м^2 • час • стер);
$F(>E) = 3{,}90 \cdot 10^{+04} \cdot E^{-2,0}$ позитронов / (м^2 • час • стер);

Ожидаемые поток фотонов с энергией больше заданной из центра Галактики.

$F(>E) = 8{,}36 \cdot 10^{+02} \cdot E^{-1,7}$ фотонов / (м^2 • час • стер);

Спектр фотонов построен из предположения, что он образован распадом π^0 – мезонов рожденных при взаимодействии протонов ГКЛ с межзвездным веществом в центральных областях Галактики. Это предположение справедливо при энергиях фотонов больше 0,3 ГэВ. В данных аналитических выражениях энергия для протонов, электронов, фотонов измеряется в единицах ГэВ, для ядер космических лучей – в единицах ГэВ на нуклон. Полученные таким образом функциональные зависимости

интенсивности потока ядерной компоненты ГКЛ от энергии показано на рисунке 9 и электронно- фотонной компоненты ГКЛ на рисунке 10. Потоки ГКЛ указанных энергий способны при наличии большой массы вещества КА порождать электронно-фотонные ливни и электронно-ядерные ливни аналогичные ШАЛ.

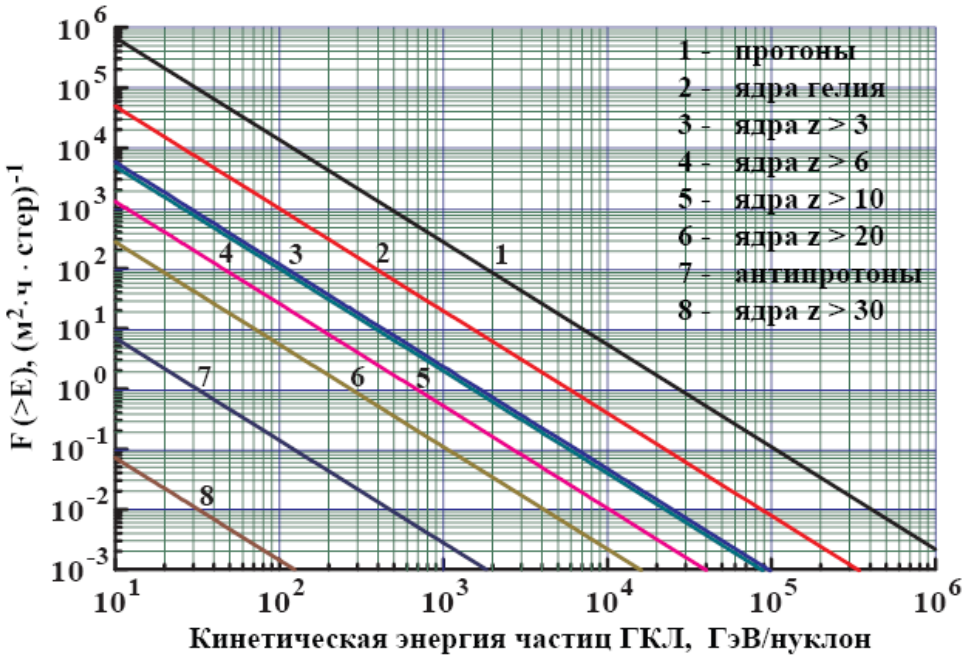

Рис. 9. Ожидаемые интегральные потоки частиц ядерной компоненты ГКЛ от 10 ГэВ до 10^6 ГэВ в околоземном космическом пространстве [2].

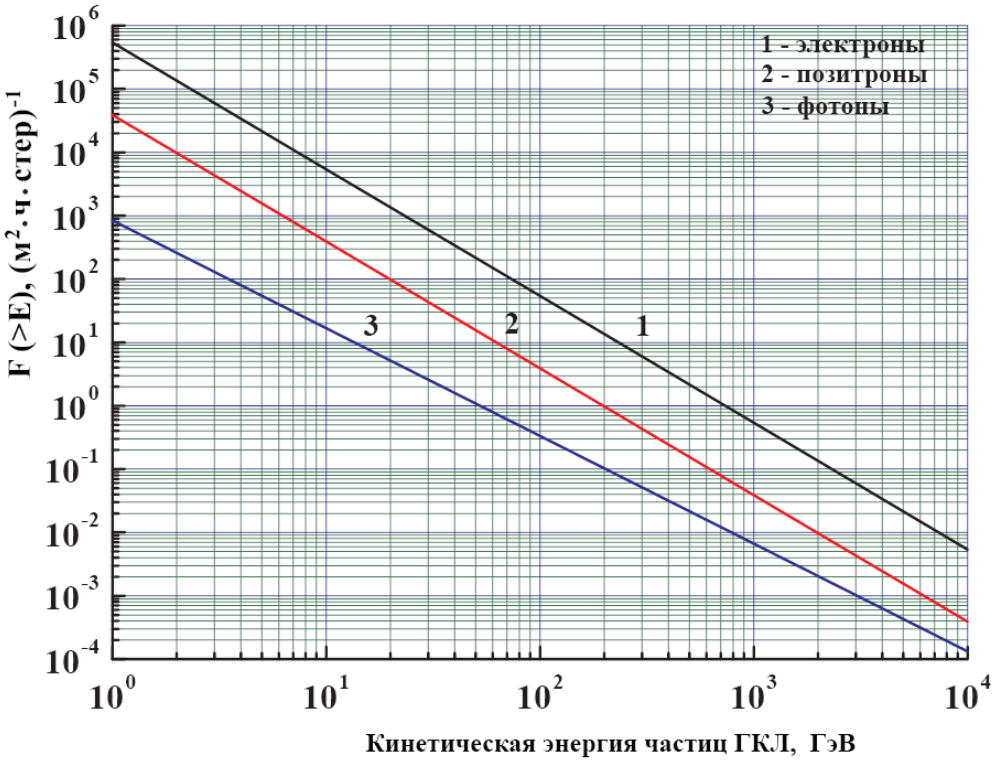

Рис. 10. Ожидаемые интегральные потоки частиц электронно-фотонной компоненты ГКЛ от 1 ГэВ до 10^4 ГэВ [2].

Ожидаемые энергетические спектры частиц ГКЛ и СКЛ в области энергий от 1 до 10^5 МэВ. Дифференциальные энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ на орбите Луны, для периодов минимума и максимума солнечной активности приведены на рис. 11 (см. [32]). При энергии частиц КЛ менее 300 МэВ, не зависимо от солнечной активности интенсивность потока частиц СКЛ превосходит интенсивность потока частиц ГКЛ. При энергии частиц около 30 МэВ интенсивность потока частиц СКЛ в максимуме солнечной активности превосходит интенсивность потока частиц ГКЛ более чем 100 тысяч раз. При энергии частиц КЛ более 1000 МэВ, не зависимо от солнечной активности, интенсивность потока частиц ГКЛ всегда превосходит интенсивность потока частиц СКЛ.

На рис. 12 показан ожидаемый на орбите Луны дифференциальный энергетический спектр ионов ГКЛ в период минимума солнечной активности (см. 32). Интенсивность потока тяжелых (тяжелее железа) ядер ГКЛ с энергией более 30 МэВ/нуклон около 1000 и более раз меньше, чем интенсивность потока протонов ГКЛ. Все оценки потоков частиц СКЛ выполненные с доверительным уровнем 95%, т.е. вероятность того, что данные значения потоков частиц будут превышены, составляет величину не более 1% [32].

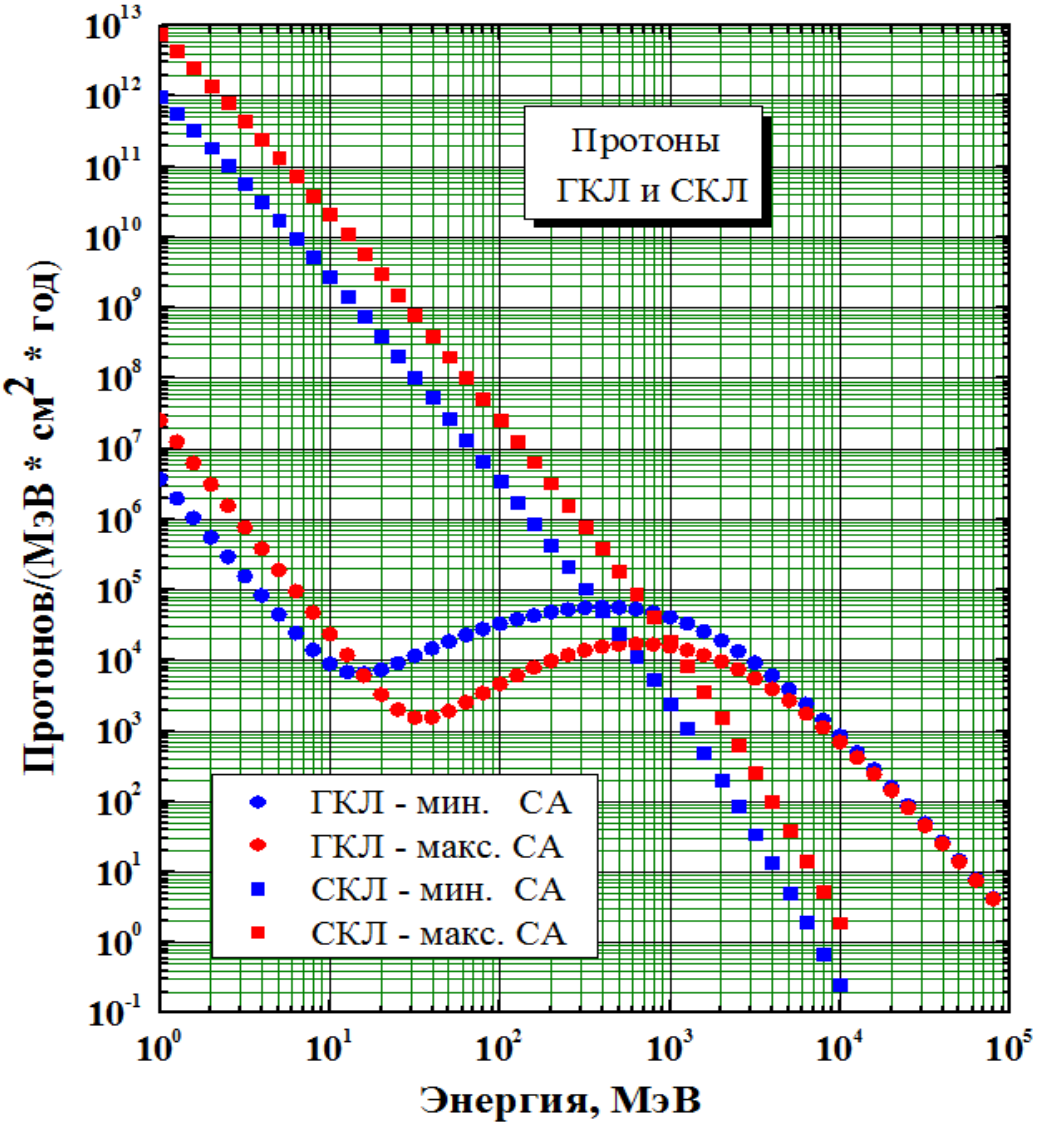

Рис.11. Ожидаемые энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ в годы минимума и максимума солнечной активности в диапазоне энергий от 1 МэВ до 10^5 МэВ [32].

Заметим, что интенсивность потока частиц ГКЛ при энергии менее 100 МэВ много меньше интенсивности потоков частиц внутреннего РПЗ и интенсивности частиц СКЛ от солнечных вспышек средней и большой мощности. Но при энергии частиц более 10 ГэВ интенсивность частиц ГКЛ превосходит интенсивность потоков частиц РПЗ и СКЛ. Энергия отдельных частиц ГКЛ может превышать 10^{11} ГэВ, в то время как энергия частиц РПЗ не превышает 1 ГэВ, а СКЛ не превышает 10 ГэВ. В состав частиц ГКЛ входят ядра всех химических элементов. Например, линейная передача энергии (ЛПЭ) отдельных частиц ГКЛ веществу, в конце своего пробега, может достигать величины около 100 МэВ• $см^2$/мг (ядро урана). Заметим, что большинство электронных компонент, которые входят в состав электронного

оборудования КА, способны нормально функционировать при условии, что проходящие через них заряженные частицы космических лучей имеют ЛПЭ не более 60 МэВ• см^2/мг.

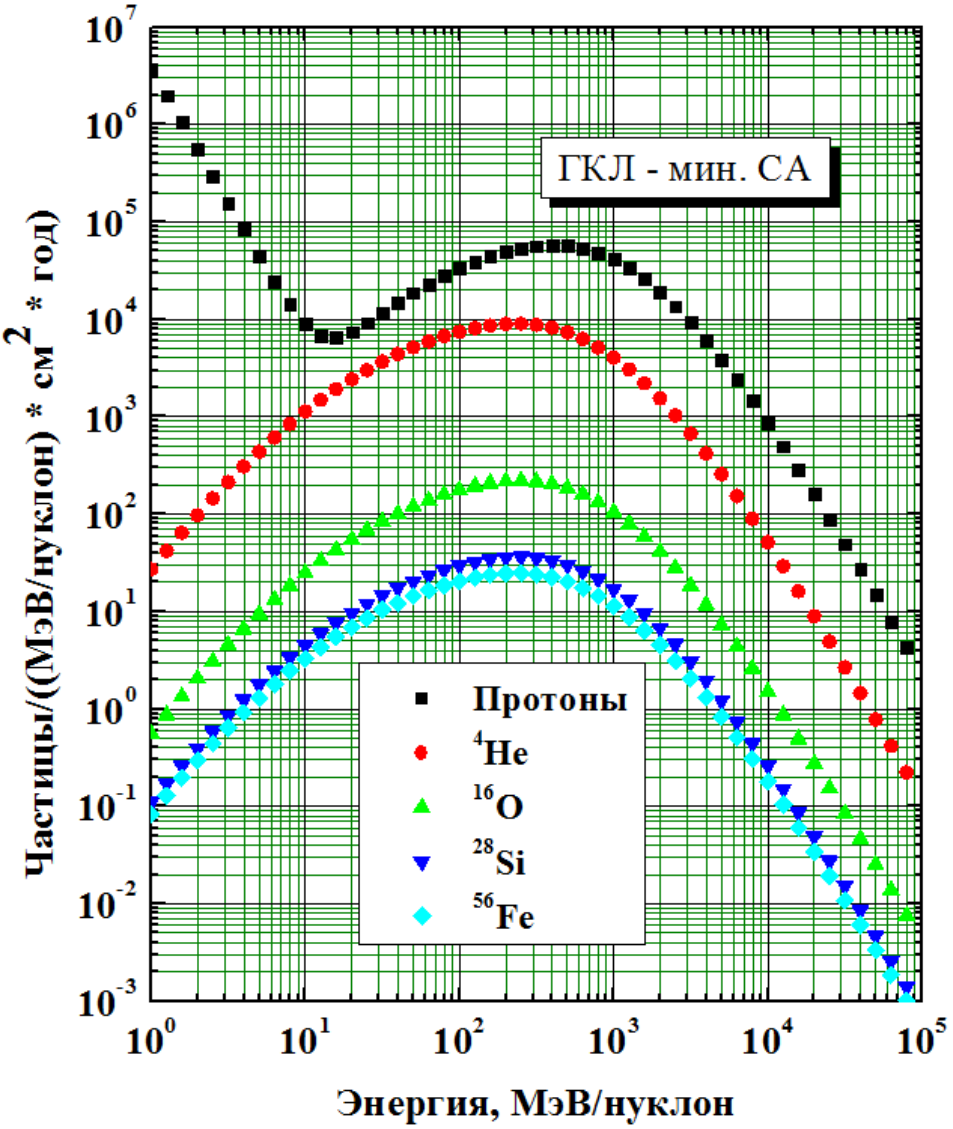

Рис.12. Ожидаемые энергетические спектры ядер ГКЛ в годы минимума солнечной активности [32].

Несмотря на то, что интенсивность потока частиц ГКЛ очень низкая, всегда имеется отличная от нуля вероятность того, что одна единственная частица ГКЛ может привести к сбою работы электронной системы КА или полному ее отказу. При краткосрочных космических полетах, вклад полную поглощенную дозу радиации частиц ГКЛ, по сравнения с радиацией от частиц РПЗ и СКЛ, не значительный, но угроза выхода из строя электронных устройств КА под воздействием отдельных тяжелых ядер ГКЛ (платины, золота, ртути и более тяжелых ядер) остается существенной. Имеется еще одна особенность частиц ГКЛ, в отличие от частиц РПЗ и СКЛ, это

способность этих частиц глубоко проникать внутрь вещества. В космических условиях, невозможно создать надежную радиационную защиту от высокоэнергичных частиц ГКЛ. Например, для защиты от ионизирующего действия протонов ГКЛ с энергией 10 ГэВ потребовался бы защитный экран из алюминия массовой толщиной 5000 г/см^2 .

Потоки протонов КЛ на различных глубинах в лунном грунте.
На рис. 13 приведены ожидаемые дифференциальные энергетические спектры вторичных протонов от первичных протонов ГКЛ : на высоте 25,5 см на лунным грунтом (черный цвет); под лунным грунтом на глубине 76 см (красным цветом); под лунным грунтом на глубине 328,5 см (зеленым цветом); под лунным грунтом на глубине 600 см (синим цветом).

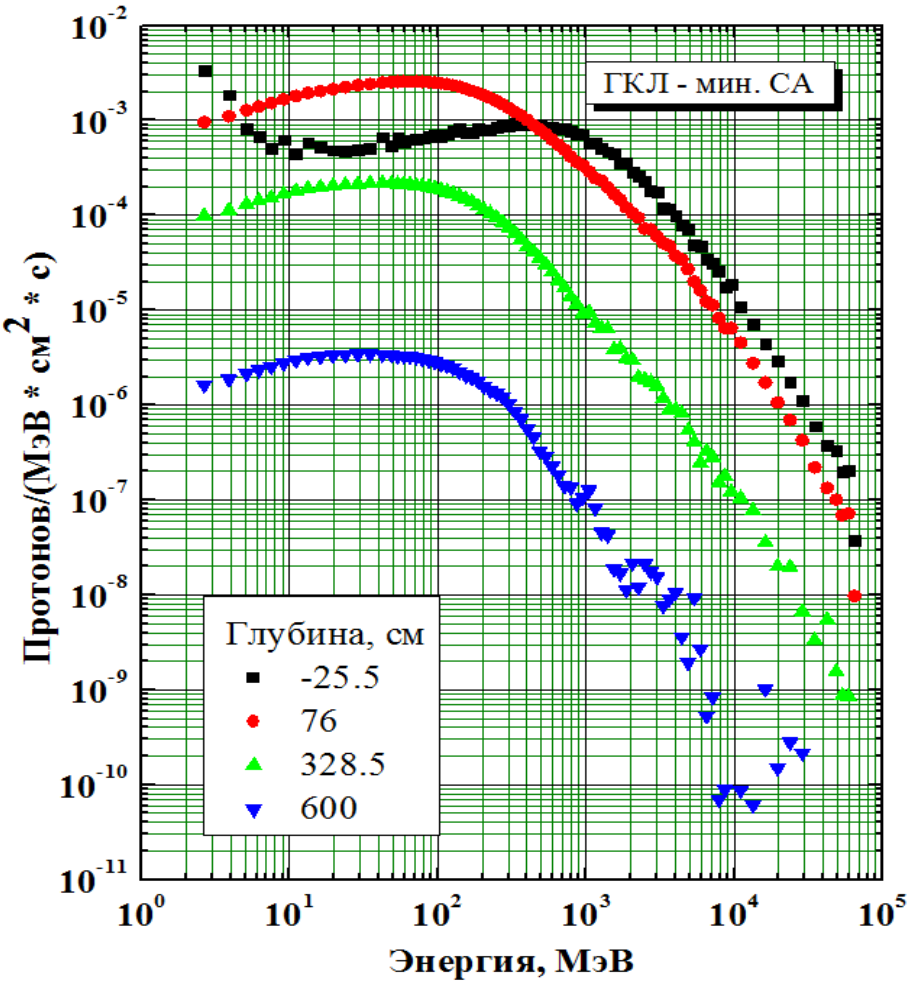

Рис.13. Дифференциальные энергетические спектры вторичных протонов от первичных протонов ГКЛ на различных глубинах в лунном грунте [32].

На рис. 14 приведены ожидаемые дифференциальные энергетические спектры вторичных нейтронов от первичных протонов ГКЛ : на высоте 25,5 см на лунным грунтом (черный цвет); под лунным грунтом на глубине 76 см (красным цветом); под лунным грунтом на глубине 328,5 см (зеленым цветом); под лунным грунтом на глубине 600 см (синим цветом).

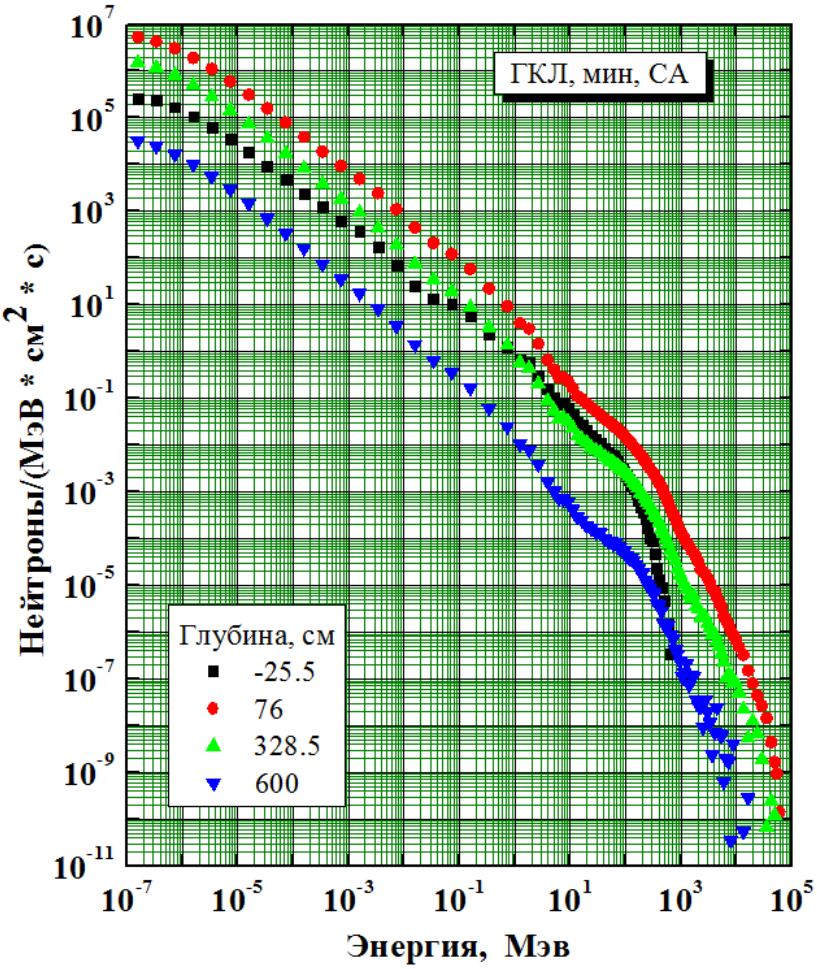

Рис.14. Дифференциальные энергетические спектры вторичных нейтронов от первичных протонов ГКЛ на различных глубинах в лунном грунте [32].

На рис. 15 приведены ожидаемые дифференциальные энергетические спектры вторичных протонов от первичных ядер ГКЛ на глубине 76 см лунного грунта: поток вторичных протонов от первичных протонов ГКЛ (черный цвет); поток вторичных протонов от первичных ядер гелия ГКЛ (красный цвет); поток вторичных протонов от первичных ядер кислорода ГКЛ (зеленый цвет); поток вторичных протонов от первичных ядер кремния ГКЛ (синий цвет); поток вторичных протонов от первичных ядер железа ГКЛ (голубой цвет);

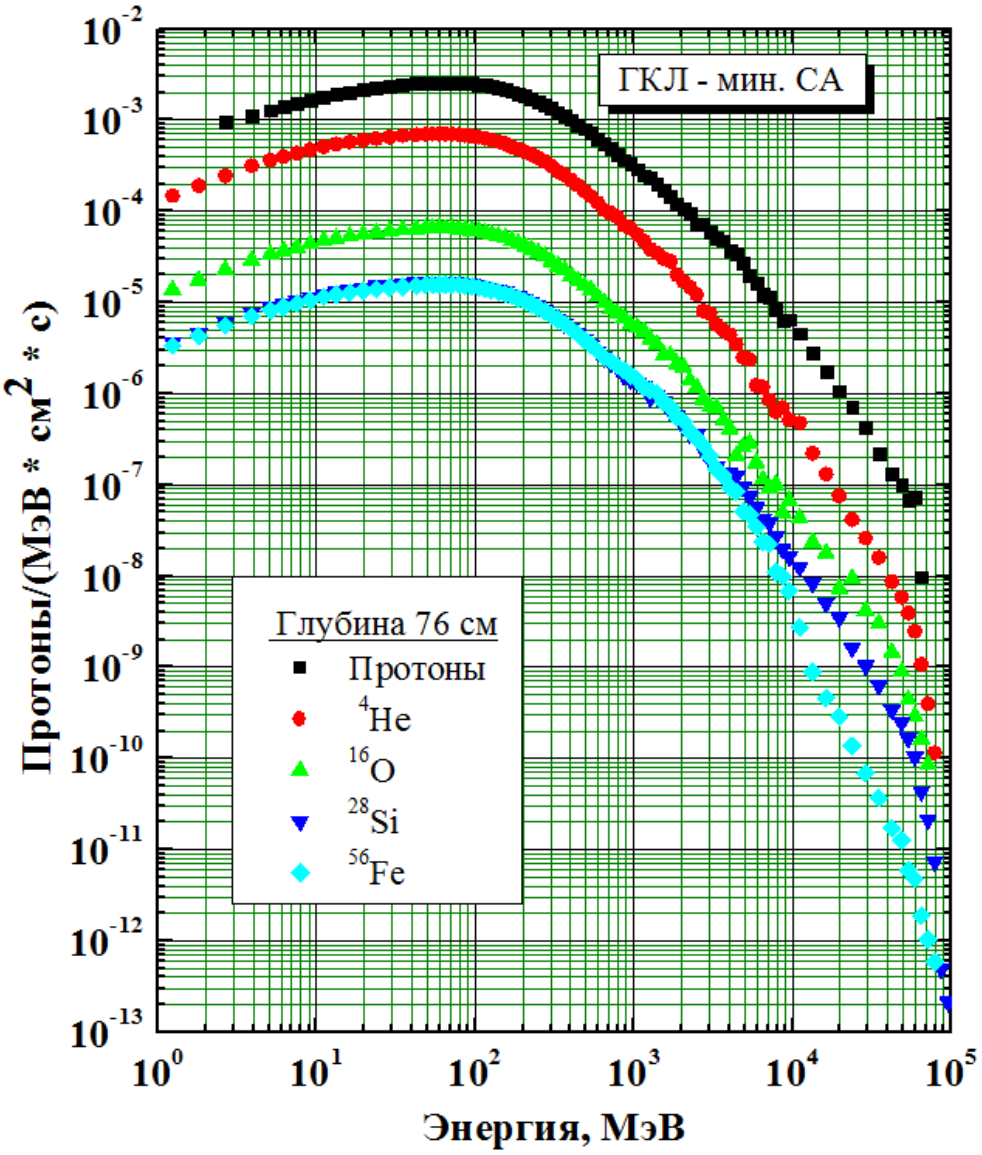

Рис.15. Дифференциальные энергетические спектры вторичных протонов от первичных ядер ГКЛ на глубине 76 см в лунном грунте [32].

На рис. 16 приведены ожидаемые дифференциальные энергетические спектры вторичных нейтронов от первичных ядер ГКЛ на глубине 76 см лунного грунта: поток вторичных нейтронов от первичных протонов ГКЛ (черный цвет); поток вторичных нейтронов от первичных ядер гелия ГКЛ (красный цвет); поток вторичных нейтронов от первичных ядер кислорода ГКЛ (зеленый цвет); поток вторичных нейтронов от первичных ядер кремния ГКЛ (синий цвет); поток вторичных нейтронов от первичных ядер железа ГКЛ (голубой цвет);

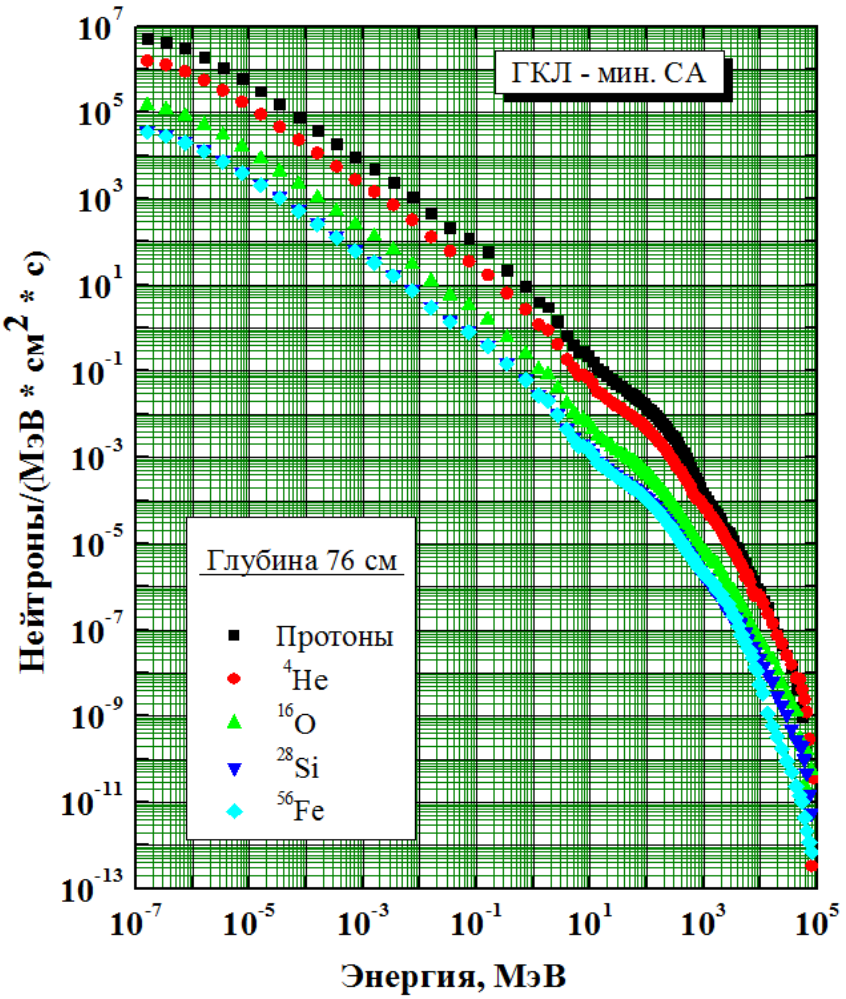

Рис.16. Дифференциальные энергетические спектры вторичных нейтронов от первичных ядер ГКЛ на глубине 76 см в лунном грунте [32].

2.5 Доза на орбите и поверхности Луны от частиц ГКЛ и СКЛ

Единицы измерения радиоактивности и дозы радиации. Для оценки величины дозы радиации, и радиоактивности используют специальные единицы измерения, которые делятся на внесистемные единицы и единицы в системе СИ. В табл. 1 приведены единицы измерения радиоактивности, экспозиционной дозы, эквивалентной дозы, поглощенной дозы, интегральной дозы. Активность радиоактивного вещества – это число ядерных превращений в единице объема («объёмная активность») или в единице массы вещества («удельная активность») в одну секунду. Различные виды доз радиации:

-экспозиционная доза — это суммарный заряд всех ионов одного знака в единице массы вещества (воздуха);
- поглощенная доза – это энергия ионизирующего излучения, переданная единицы массы вещества;
- эквивалентная доза – это поглощенная доза, умноженная на специальный коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ).
Для гамма излучения (ОБЭ =1) справедливо равенство 1 Зв = 1 Гр =1 Дж / кг = 1 м² / с² .

Т а б л и ц а 1. Единицы измерения радиации.

Измеряемая величина	Наименование единиц измерения		Связь между единицами измерения
	Внесистемные	Си	
Радиоактивность	Кюри (Ки)	Беккерель (Бк)	1 Бк = 1 расп/с 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк 1 Ки = 37 гигабеккерелей (ГБк)
Экспозиционная доза	Рентген (Р) (для фотонного излучения)	Кулон/кг (Кл/кг)	1 Кл/кг=$3,88 \cdot 10^{3}$ Р 1 Р = 0,85 рад. (в воздухе)
Поглощенная доза	Рад (рад)	Грей (Гр)	1 Гр = 1 Дж/кг 1 рад = 100 эрг/г 1 Гр = 100 рад 1 сГр = 1 рад 1 мГр=10^{-3}Гр 1 мкГр=10^{-6}Гр
Эквивалентная доза	Бэр (бэр) (биологический эквивалент рентгена)	Зиверт (Зв)	1 Зв=100 бэр 1 сЗв=10^{-2} Зв =1 бэр 1 мЗв = 10^{-3} Зв 1 мкЗв =10^{-6} Зв
Интегральная доза	Рад-грамм (рад·г)	Грей- кг (Гр·кг)	1 Гр·кг = 10^{5} рад·г

Вклад различных компонент частиц ГКЛ в поглощенную дозу.
Поглощенная доза радиации на орбите Луны в минимуме солнечной активности от частиц ГКЛ может составлять величину около 680 мкГр/сутки. Вблизи поверхности Луны, из-за экранирования, ожидаемая доза радиации от частиц ГКЛ будет почти в два раза меньше, т.е. около 372 мкГр / сут [34,35]. Вклад в эту дозу радиации первичного потока частиц ГКЛ ~ 91,4% . Из них, вклад от протонов ГКЛ составляет ~ 42,8 % , от альфа-частиц ГКЛ ~ 18,5 % , от тяжелых ионов около 30,1 %, вклад в оставшиеся 8.62 % дозы радиации дают вторичные частицы, возникающие при взаимодействии частиц ГКЛ с веществом Луны. Ожидаемый состав вторичного излучения: протоны (3,1%) и электроны (2,2%) , позитроны (1,5 %) , гамм (1,1 %) и нейтроны (0,7 %) . Относительный вклад в общую дозу радиации от частиц ГКЛ показан на рис.17.

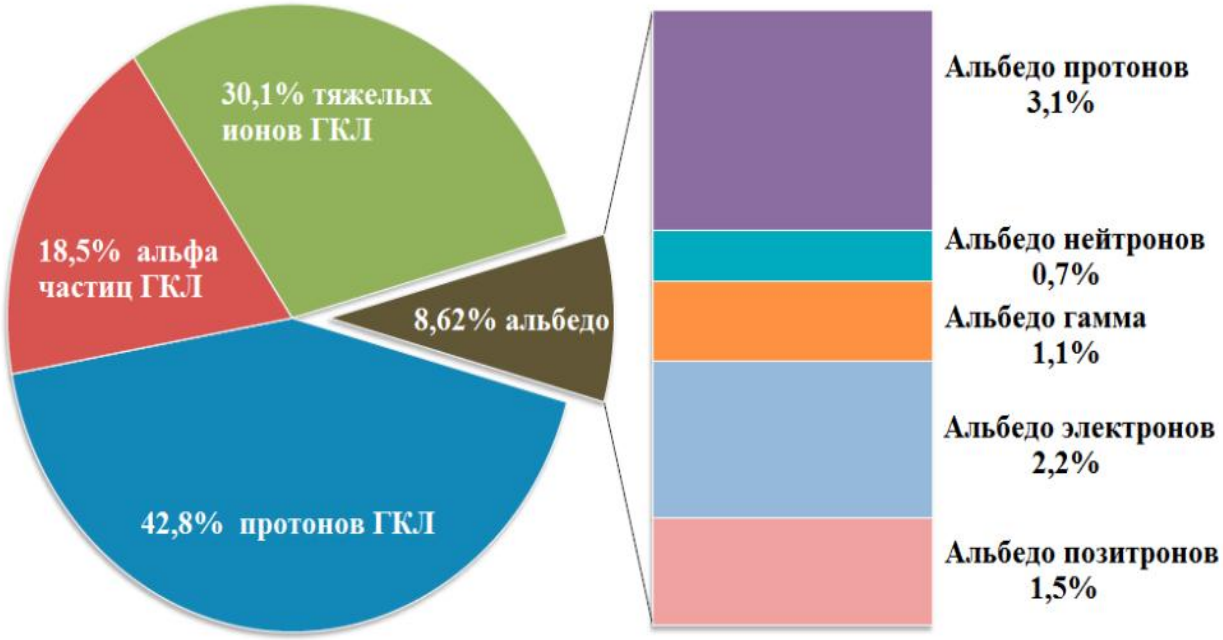

Рис.17. Результаты расчетов вклада в поглощенную дозу радиации различных компонент ГКЛ и вторичного излучения (альбедо) от поверхности Луны. (H. E. Spence [34], M. D. Looper [35]).

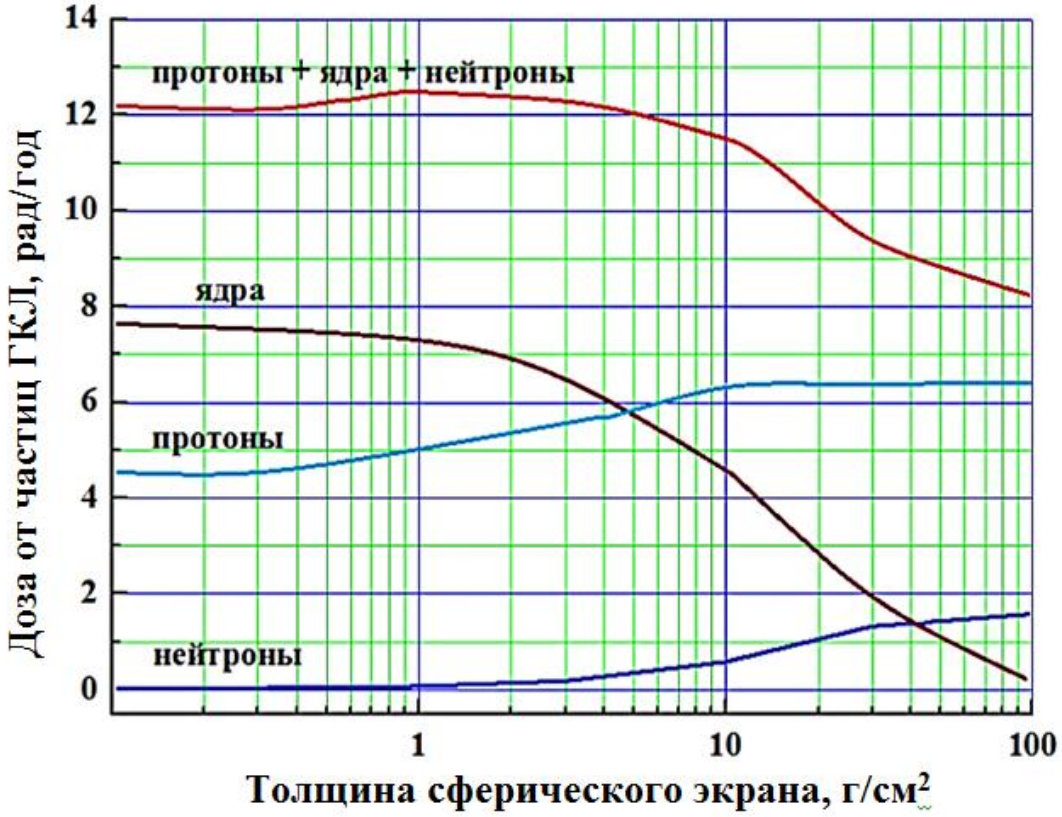

Рис. 18. Оценка полной поглощенной дозы радиации от частиц ГКЛ в центре сферы из алюминия на орбите Луны, в период минимума солнечной активности. Ожидается, что доза радиации на поверхности Луны от частиц ГКЛ будет в 2 раза меньше.

На рис. 18 приведены результаты оценки поглощённой дозы радиации за год внутри сферы из алюминия на орбите Луны от частиц ГКЛ. Использовались данные, рассчитанные для минимума СА спектры ГКЛ на орбите Луны. В диапазоне толщин защитного экрана от 0,1 до 10 г/см^2 поглощённая доза радиации составляет величину около 12 рад/год. Следует ожидать, что практически все сбои и возможные отказы в работе электронных устройств КА на орбите Луны в период близкий к минимуму СА будут связаны с тяжёлыми ядрами и высокоэнергичными протонами ГКЛ. Под радиационной защитой менее 3 г/см^2 поглощённая доза определяется в основном ядрами гелия и более тяжёлыми ядрами, под сферическим экраном массовой толщиной 20 г/см^2 доза от ядер ГКЛ уменьшается более чем в 2,5 раза (от ~8 до 3 рад/год), при этом полная доза радиации определяется в основном протонами. При толщине защитного экрана 40 г/см^2 доза от ядер ГКЛ уменьшается в 4 раза (от ~8 до 2 рад/год). При дальнейшем увеличении толщины защиты уменьшение поглощённой дозы от ядер ГКЛ замедляется. В связи с этим радиационную защиту толщиной в 40 г/см^2 можно рекомендовать как минимальную защиту от частиц ГКЛ и соответственно от частиц СКЛ.

Но если предположить, что в период Лунной экспедиции произойдёт хотя бы одна сверхмощная вспышка с энергетическим спектром частиц, аналогичным спектрам солнечных вспышек 11.05.1959 и 12.11.1960 гг. [36], то поглощённая доза за вспышку на орбите Луны внутри сферы из алюминия будет соответствовать значениям, приведенным в таблице. 2. На поверхности Луны доза радиации будет в 2 раза меньше из-за экранирования Луной в угле 2π стерадиан.

Т а б л и ц а 2. Оценка поглощённой дозы радиации на орбите Луны от частиц СКЛ сверхмощных солнечных вспышек 1956 и 1060 гг. Предполагается, что из-за экранирования, доза радиации на поверхности Луны была в 2 раза меньше, чем приведенная в таблице.

Толщина экрана из AL, г/см^2	Доза на орбите Луны от СКЛ, рад	
	11 мая 1959 г.	12 ноября 1960 г.
1	400	200
3	100	50
5	60	40
10	24	20
20	10	10

В таблице 3 приведены расчетные значения среднетканевой эквивалентной дозы, создаваемой на поверхности Луны за экраном различной толщины в течение 1 года в периоды минимума и максимума солнечной активности [33]. Суммарная среднегодовая доза радиации от солнечных вспышек оценивалась с использованием 99% доверительного уровня , т.е. реальная доза радиации от частиц СКЛ может превысить значения приведенные в таблице 3, только в 1 случаи из 100.

Таблица 3. Расчетные значения среднетканевой эквивалентной дозы, создаваемой на поверхности Луны за экраном различной толщины в течение 1 года в периоды минимума и максимума солнечной активности [33].

Толщина Экрана	**ГКЛ**			**СКЛ**		
	Заряженные частицы	Нейтроны от экрана	Нейтроны от грунта	Заряженные частицы	Нейтроны от экрана	Нейтроны от грунта
г/см^2	**Минимум солнечной активности (доза в сЗв/год)**					
0,1	41,6	0,08	1,12	67 300	2,00	0,39
1	39,6	0,20	1,15	1 400	0,78	0,079
10	22,7	1,76	1,23	22	0,70	0,0052
31,6	8,.4	4,37	1,12	2,2	0,51	0,00093
г/см^2	**Максимум солнечной активности (доза в сЗв/год)**					
0,1	21,6	0,047	0,66	398 000	12,5	1,43
1	20,5	0,12	0,68	9300	5,64	0,19
10	12,9	1,06	0,76	182	6,23	0,030
31,6	5,0	2,72	0,73	20,6	5,08	0,0053

Заключение

При полете к за пределы магнитосферы желательно выбирать периоды с низким потоком релятивистских электронов внешнего РПЗ. Прогнозирование таких периодов возможно при наличии данных о скорости солнечного ветра [2, 3, 37]. В минимуме солнечной активности, при отсутствии солнечных вспышек, поглощенная доза радиации от частиц ГКЛ на орбите Луны составляет величину около 680 мкГр/сутки, на поверхности Луны ~ 372 мкГр/сутки. Защита космонавтов от мощных солнечных вспышек должна быть не менее 40 г/см^2 Искусственные или естественные укрытия (например, пещеры в гористой местности или шахты в равнинной области на глубине в несколько кг/см^2) позволят для космонавтов создать комфортные радиационные условия для длительного проживания и работы в течение десятков лет. Работы на поверхности Луны (в период отсутствия вспышек СКЛ) в течении года не представляет радиационной угрозы для космонавтов .

Список использованных источников

1. G. H. Heiken, D. T. Vaniman and B. M. French: Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon (Cambridge University Press, 1991). -655 с. [Электронный ресурс] – книга (формат pdf, 61,70 MB). - Режим доступа: http://bookfi.org/book/1103287 свободный или http://cosmophysics.ru/articles/Luna/Luna91.pdf
2. И.П. Безродных, А.П.Тютнев, В.Т. Семенов / Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве // М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. -106 с.
3. И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович, В.Т. Семенов / Радиационные нагрузки на космические аппараты при выводе их на межпланетную траекторию в период минимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». - 2013.- том. 132. -№1. - С. 7-12. [Электронный ресурс]. – – Статья (формат pdf) - Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/132/7.pdf свободный.
4. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. М. Полищука и д-ра техн. наук, проф. К.М. Пичхадзе. – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 660 с.
5. Т. Каулинг / Магнитная гидродинамика. - М.: Изд. Ин. Лит., 1959. -132 с.
6. Э.Р. Мустель/ Квазистационарные истечения частиц из активных областей на Солнце и корональные дыры // Астрон. Ж. – 1980. – Т. 57. – № 2. – С. 225 – 230.
7. К.Г. Иванов / Структура типичного нестационарного потока межпланетной плазмы по данным непосредственных измерений // УФН. – 1974. – Т.114. – № 2. – С. 382 – 383.
8. Е.Н. Паркер / Динамические процессы в межпланетной среде /– Пер. с англ. – М.: Мир, 1965, - 362 с.: ил.
9. А. Хундхаузен / Межпланетные ударные волны, генерируемые солнечными вспышками // В кн.: Расширение короны и солнечный ветер. – М.: Мир, 1976. – С. 212-271.
10. Г.Ф. Крымский / Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве // – М.: Наука, 1969. -151 с.: ил.
11. А.В. Белов, Л.И. Дорман, Б.А. Шахов / Модель движущегося магнитного зеркала и форбуш- эффект в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. -1973. –Т.13. -№ 3. – С. 399-405.
12. Н.П. Чирков, А.Т. Филиппов / Ускорение частиц до релятивистский энергий в межпланетной среде // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1977. – Т.41. -№ 9. – С. 1776 – 1781.

13. Е.И. Морозова, О.Б. Ликин, Н.Ф. Писаренко / Распространение заряженных частиц, генерированных во вспышке 7.08.1972 // Геомагнетизм и аэрономия. – 1977. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 811 – 819.
14. Л.И. Мирошниченко, В.М. Петров / Динамика радиационных условий в космосе // – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 152 с.: ил.
15. В.Г. Григорьев, И.П. Безродных, Е.И. Морозова, и др. / Отклик в изменениях приземного давления на воздействие космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. -2002. –Т.42. -№ 4. – С. 547-549.
16. В.Е. Тимофеев, В.Г. Григорьев, Е.И. Морозова и др. / Воздействие космических лучей на скрытую энергию атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т.43. – № 5. – С. 683 – 687.
17. И.П. Безродных / Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли // - Кандидатская диссертация, ИЗМИРАН. – 1985. – 197 с. (рукопись).
18. И.П. Безродных, В.А. Кузьмин, В.И. Козлов и др./ Динамика частотного спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля и космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 6. – С. 1016 – 1018.
19. И.П. Безродных, Е.И Морозова, С.Г. Казанцев, В.Т. Семенов / Структура и динамика межпланетных ударных волн и их влияние на радиационные условия на орбитах космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119. - № 6. – с. 15-24. [Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/119/15.pdf , свободный.
20. Я. Л. Блох, И. Я. Либин, К. Ф Юдахин / Флуктуации космических лучей на Земле во время солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. - 1984, -Т. 24, -№ 6. – С. 875-878.
21. E.I. Morozova, N.F. Pissarenko, W. Reidler, K. Schwingenschuh, G. Schelch, I.P. Bezrodnykh / The Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts / – Preprint IWF 8406 – Austria: Space Research Institute. 1984. – 41p.
22. E.I. Morozova, N.F. Pissarenko, Ye.G. Yeroshenko, W. Reidler, K. Schwingenschuh, G. Schelch, I.P. Bezrodnykh / The Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts // Twenty-Fifth Plenary Meeting Committee on Space Research. XXV COSPAR, Gras, Austria, 25 June-7 July 1984. P.140-141.
23. Е.И. Морозова, Л.В. Евдокимова, Е.Ю. Будник, Е.Г. Ерошенко, И.П. Безродных, Н.Ф. Писаренко, В. Ридлер, К. Швингеншу / Динамика

спектра мощности ММП за фронтом ударной волны 1-2 февраля 1982 г. // Солнечный ветер и околоземные процессы. М.: Наука, 1986 г., с. 8-19.

24. Е.И. Морозова, Л.В. Евдокимова, Е.Ю. Будник, Е.Г. Ерошенко, И.П. Безродных, Н.Ф. Писаренко, В. Ридлер, К. Швингеншу / Межпланетная ударная волна 1 февраля 1982 г.; Магнитная структура и спектр мощности ММП // Космические исследования. -1986. Т. 24. -№ 6. – С.917-925.
25. Г.Ф. Крымский / Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны / // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 234. – № 6. – С.1306 – 1308.
26. Г.Ф. Крымский, В.К. Елшин, Ю.А. Ромащенко и И.П. Безродных / Исследование временных характеристик процесса ускорения заряженных частиц на ударном фронте // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1978. – Т. 42. – № 5. – С. 1070 – 1074.
27. Е.Г. Бережко, В.К. Елшин, Г.Ф. Крымский / Генерация космических лучей ударными волнами / [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1988. – 189 с.: ил.
28. В.Е. Тимофеев, В.В. Клименко, И.П. Безродных , Е.И. Морозова, Н.Ф. Писаренко, И.А. Транский / Динамика потока энергичных солнечных частиц вблизи крупномасштабных возмущений солнечного ветра // Космические исследования. – 1989. – Т.27. – Вып. 2. – С. 272 – 279.
29. Л.И. Дорман / Космические лучи: состав, спектр, анизотропия и происхождение // В кн.: Итоги науки и техники. Серия астрономия. Под редакцией докт. Физ.- мат. наук А.П. Кропоткина. – М.: ВИНИТИ, 1988. –Т.33. – С. 3-120.
30. В.Л. Гинзбург, С.И. Сыроватский / Происхождение космических лучей // М.: РАН СССР.- 1963. – 384 с.: ил.
31. И.П. Безродных / Оценка верхней границы энергии частицы, ускоренной вблизи вращающейся нейтронной звезды // В кн.: Высокоэнергичные частицы в космосе. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 67-69.
32. А.Н. Денисов , Н.В. Кузнецов, Р.А. Нымmик, М.И. Панасюк, Н.М. Соболевский / К проблеме радиационной обстановки на Луне // Космические исследования. 2010, Т.48, №6, С. 524-531.
33. Н. В. Кузнецов, р. А. Нымmик, м. И. Панасюк, А. Н. Денисов, Н. М. Соболевский / Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне // Космические исследования. 2012, Т.50, №3, С. 224-228.

34. H. E. Spence, M. J. Golightly, C. J. Joyce, M. D. Looper, N. A. Schwadron, S. S. Smith, L. W. Townsend, J. Wilson, and C. Zeitlin / Relative contributions of galactic cosmic rays and lunar proton "albedo" to dose and dose rates near the Moon. // SPACE WEATHER, VOL. 11, - 643–650, doi:10.1002/2013SW000995, 2013.
[Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http:// www.cosmic-rays.ru/articles/Luna/swe20107a.pdf , свободный.

35. M. D. Looper, J. E. Mazur, J. B. Blake, H. E. Spence, N. A. Schwadron, M. J. Golightly, A. W. Case, J. C. Kasper and L. W. Townsend / The radiation environment near the lunar surface: CRaTER observations and Geant4 simulations // SPACE WEATHER, VOL. 11, 142–152, doi:10.1002/ swe.20034, 2013.

36. О. Д. Брилль, А. И. Вихров, С. С. Городков [и др] / Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей // – М. : АТОМИЗДАТ, 1968. – 264 с.

37. И.П. Безродных / Изобретение способа определения энергетического спектра электронов на геостационарной орбите // Авторское свидетельство № 1500121, заявка № 4349473, приоритет от 16.11.87 г.

Август 2014 . г. Москва. ИКИ РАН
ibezrodnykh@ yandex.ru