И. П. Безродных ИКИ РАН
(редакция 2021.11.13)

КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ - ОСНОВНАЯ УГРОЗА ПРИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ.

Источники ионизирующих излучений представляющих потенциальную опасность для космических миссий.

1. При пересечении космическим аппаратом (КА) радиационных поясов Земли (РПЗ), КА подвергается воздействию потоков заряженных частиц захваченных в геомагнитном поле. При пересечении области аврорального овала возможно воздействие потоков релятивистских электронов, высыпающихся из внешнего РПЗ.
2. В периоды повышенной солнечной активности возможны мощные солнечные вспышки, порождающие в межпланетном пространстве потоки частиц солнечных космических лучей (СКЛ) и межпланетные ударные волны. Высокоэнергичные частицы СКЛ и частицы ускоренные межпланетными ударными волнами представляют основную опасность для межпланетных полетов и на поверхности Луны, если толщина защитного экрана из алюминия менее 20 г/см^2.
3. В межпланетной среде и на поверхности Луны, КА дополнительно подвергается воздействию частиц галактических космических лучей (ГКЛ). Для существенного уменьшения количества тяжелых ядер частиц ГКЛ, воздействующих на экипаж КА, толщина защитного экрана должна быть не менее 40 г/см^2.

ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

С.Н. Вернов [1-5], по данным «ИСЗ-2» (запуск 3 ноября 1957 г.) и «ИСЗ-3» (запуск 15 мая 1958 г.), Дж. Ван Аллен [6], по данным «Explorer-I» (запуск 31 января 1958 г.) и «Explorer-III» (запуск 26 марта 1958 г.), анализируя данные измерений счетчиков ионизирующих излучений по траектории полета космических аппаратов, пришли к заключению, что потоки высокоэнергичных заряженных частиц распределены в околоземном космическом пространстве неравномерно. Основная часть потоков частиц космических лучей сосредоточена в ограниченной области пространства вблизи Земли. Это можно было объяснить, предполагая, что для заряженных частиц космических лучей магнитное поле Земли представляет собой магнитную ловушку в форме искаженного тороида. Потоки частиц в этой ловушке (радиационном поясе Земли) могут в миллионы раз превосходить потоки аналогичных частиц за ее пределами [7]. Так произошло открытие радиационного пояса Земли. Радиационный пояс Земли один. Провал в интенсивности потока высокоэнергичных электронов вблизи границы плазмопаузы, где плотность мала, происходит из-за усиления диффузии электронов в конус потерь, при их взаимодействии с электромагнитными волнами [8-10]. Для удобства, ту часть РПЗ, которая находится до провала в интенсивности потока электронов, принято называть внутренним РПЗ. Остальную часть - внешним РПЗ. Описание структуры РПЗ дано во многих работах, например [11-13]. Внутренний РПЗ относительно стабилен, интенсивность потоков ионизирующих излучений со временем меняется в небольших пределах. Потоки частиц внешнего РПЗ очень нестабильны. Интенсивность потоков частиц внешнего РПЗ может изменяться со временем в тысячи раз. Проблема оценки доз радиации связана с нестабильностью интенсивности потоков

релятивистских электронов внешнего РПЗ. В литературе, релятивистские электроны иногда называют убийцами электронной аппаратуры КА.

Впервые в СССР экспериментальные исследования потоков высокоэнергичных электронов внешнего РПЗ, на геостационарной орбите (ГСО), были выполнены сотрудниками лаборатории космических исследований ИКФИА СО РАН И.П. Безродных и Ю.Г. Шафером [14-16]. Было установлено, что необходимым условием для возрастания потоков высокоэнергичных электронов в магнитосфере Земли является возрастание скорости солнечного ветра. Эти работы положили начало исследованию вариаций интенсивности потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли и их связи с рекуррентными (повторяющиеся с частотой вращения Солнца) высокоскоростными потоками солнечного ветра [17- 26]. Земля, как и все планеты солнечной системы, находится в короне Солнца. По этой причине, совершенно естественно считать, что радиационные условия на орбитах космических аппаратов определяются физическими процессами внутри Солнца и на его поверхности (градиентами магнитных полей в локальных областях Солнца, динамикой диссипацией магнитной энергии, глубинными процессами внутри Солнца, следствиями которых является образование корональных дыр на Солнце и связанных с ними высокоскоростных рекуррентных потоков (струй) солнечной плазмы [25]. Радиация в околоземном космическом пространстве состоит из нескольких различных компонент, которые отличаются между собой интенсивностью потока, химическим составом и распределением частицы по энергиям. Частицы радиационных поясов Земли (РПЗ) являются одной из компонент ионизирующих излучений, в состав которой входят энергичные электроны, позитроны, протоны, антипротоны и ядра химических элементов, захваченных в геомагнитном поле [25]. При взаимодействии струи высокоскоростного потока солнечной плазмы с магнитосферой Земли наблюдается увеличение геомагнитной активности и увеличение интенсивности потоков высокоэнергичных электронов в магнитосфере Земли. Из-за высокой интенсивности потоков электронов в РПЗ, вблизи внешней границы плазмосферы развивается электронно-циклотронная неустойчивость, приводящая к генерации низкочастотных (ОНЧ) электромагнитных волн. Взаимодействие ОНЧ волн с высокоэнергичными электронами РПЗ приводит к их сбросу (высыпанию) в ионосферу Земли. Избыточный поток высокоэнергичных электронов сам создает среду (электромагнитное излучение), которая приводит к их сбросу в ионосферу [8-10, 25]. Наиболее интенсивное высыпание частиц наблюдается в области северного и южного аврорального овала. На рис. 1 схематично изображены радиационные пояса и авроральный овал, где в период геомагнитных возмущений наблюдаются высыпания релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса. Эти высыпания вызывают свечение верхних слоев атмосферы, мы их видим как полярные сияния. При высыпании электронов из РПЗ, в области аврорального овала наблюдается увеличение дозовых нагрузок на солнечно-синхронные космические аппараты (КА), (например, серии Метеор), и торможение КА, из-за увеличения плотности атмосферы в области аврорального овала.

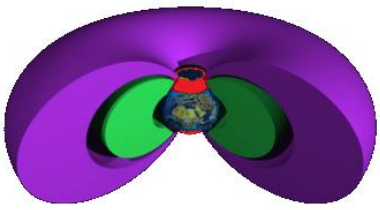


Рис. 1. Изображение внутреннего (зеленый цвет), внешнего (лиловый цвет) радиационного пояса Земли и области аврорального овала (красный цвет), где наблюдаются наиболее интенсивные и частые высыпания заряженных частиц из РПЗ в ионосферу[25].

При геомагнитных возмущениях, энергия высыпающихся частиц, электрических токов и электромагнитного излучения высвобождается в верхней атмосфере, в основном в области аврорального овала. На рис. 2 приведена фотография овала полярных сияний, сделанная с КА «Polar». Снимок овала нанесен на географическую карту Земли. Овал полярных сияний расположен около внешней границы области захваченных в геомагнитном поле электронов с энергиями больше 40 кэВ. Эта граница разделяет область замкнутых и открытых силовых линий магнитного поля. Замкнутые силовые линии магнитного поля соединяют два полушария, и частицы на этих силовых линиях могут колебаться между зеркальными точками и дрейфовать. Открытые силовые линии магнитного поля расположены в полярных шапках, внутри овала. В отличие от замкнутых силовых линий, частицы на открытых силовых линиях не могут совершать колебательных движений вдоль силовой линии и участвовать в дрейфе. Вдоль открытых силовых линий постоянно дует полярный ветер, унося вещество атмосферы планеты в межпланетное пространство.

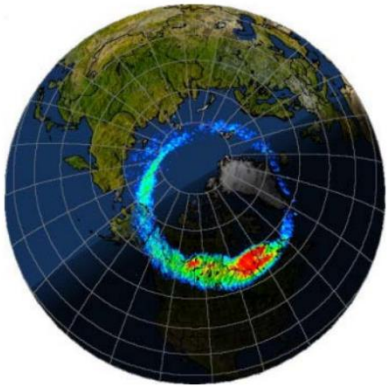


Рис. 2. Ультрафиолетовое свечение полярного овала (космический аппарат «Polar», 4.04.1997 05:18:59 UT) (http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/)

Нагрев верхней атмосферы сопровождается увеличением плотности атмосферы на орбитах, пересекающих авроральный (полярный) овал, в частности на солнечно-синхронных орбитах, например, КА «Метеор». Радиационный пояс Земли – динамическая система и его параметры могут существенно меняться в зависимости от состояния межпланетной среды. Но иногда важно иметь представление об усредненных потоках частиц в околоземном пространстве. На рис. 3 приведены радиальные профили интенсивности потоков протонов в плоскости геомагнитного экватора для нескольких пороговых энергий от 0,1 МэВ до 500 МэВ на $L < 6$ (L-параметр Мак-Илвейна, например, оболочка $L = 6$ удалена в плоскости геомагнитного экватора от центра Земли на 6Rз, где Rз – радиус Земли). Данные получены на различных космических аппаратах и усреднены по долготе и времени.

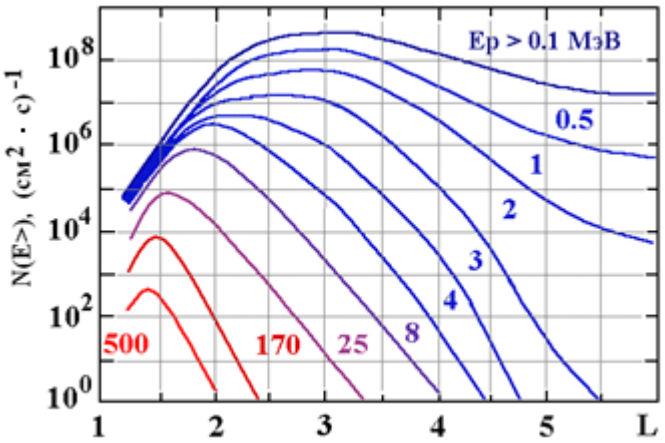


Рис. 3. Радиальные профили потоков протонов в плоскости геомагнитного экватора для L < 6 [25]

Магнитосфера Земли – это кометообразная область занятая магнитным полем Земли. Внутри магнитосферы Земли располагается магнитная ловушка заряженных частиц РПЗ. Магнитное поле в РПЗ удерживает заряженные частицы в ограниченной области пространства [25]. Уровень радиации в магнитосфере Земли в миллион раз больше, чем за пределами магнитосферы. Магнитосфера защищает планету от сверхзвуковых потоков плазмы солнечного ветра, от потоков солнечных космических лучей и потоков галактических лучей. Заметим, если бы магнитное поле Земли исчезло, то гравитационное Земли не способно было бы удержать атмосферу Земли. Солнечный ветер сдул бы всю атмосферу за очень короткий период. Планета, которая не имеет собственного магнитного поля, не может иметь атмосферу.

Пространственное распределение электронов в магнитосфере Земли более динамично, чем протонов, и менее регулярно. На рис. 4 представлены радиальные профили интенсивности потоков электронов в плоскости геомагнитного экватора для L < 12 вблизи максимума и минимума солнечной активности (СА). Обычно внешний РПЗ на расстояниях более 5Rз от центра Земли в плоскости экватора наполнен частицами до отказа, то есть до такой концентрации, которую геомагнитное поле в состоянии удержать, следовательно давление частиц практически всегда составляет величину порядка B2/8. Распределение по энергиям частиц, по питч-углам со временем меняется в зависимости от состояния межпланетной среды, солнечной активности и динамики тех процессов, которые реализуются в текущий момент внутри магнитосферы. Во время магнитной бури такое наполнение частицами радиационного пояса распространяется на более низкие высоты, до 3 – 4Rз и отвечает за главную фазу геомагнитной бури. Радиационные пояса Земли состоят в основном из электронов, позитронов, протонов и антипротонов, удерживаемых магнитным полем Земли.

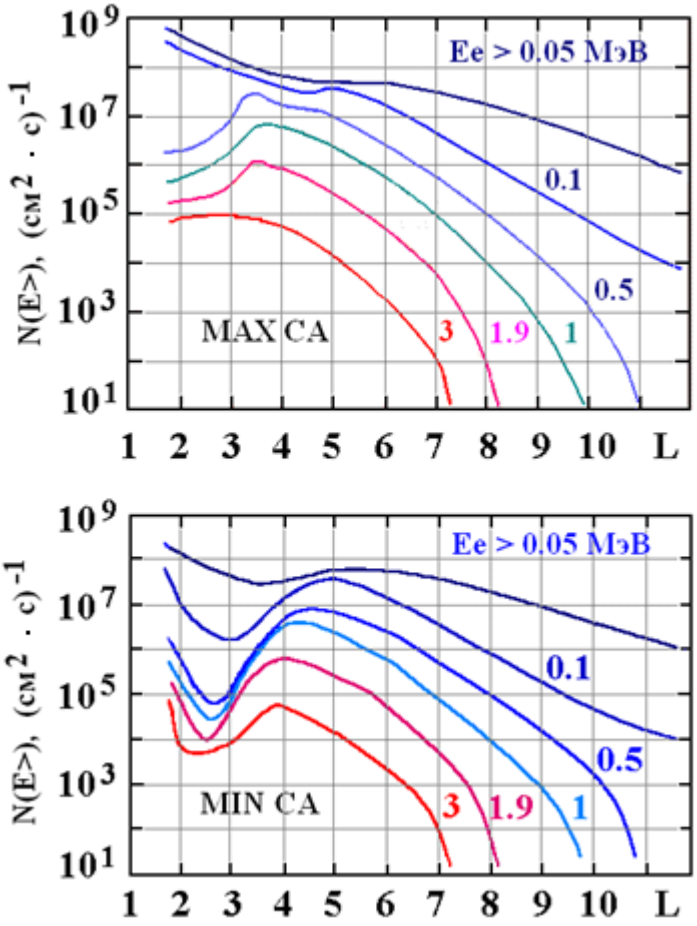


Рис. 4. Радиальные профили средних по времени потоков электронов в плоскости геомагнитного экватора для L < 12 в максимуме и минимуме СА [25]

Ядра химических элементов легкой, средней и тяжелой группы также присутствуют в радиационных поясах, но их потоки незначительны по сравнению с потоками протонов и электронов тех же энергий. Среди большого количества различных явлений, наблюдаемых в радиационных поясах, можно выделить три наиболее фундаментальных процесса, управляющих динамикой основной массы частиц:
– инжекцию в область геомагнитного захвата частиц;
– радиальную диффузию, сопровождающуюся ускорением частиц;
– питч-угловую диффузию, порождающую утечку частиц из радиационных поясов.
Инжекция и диффузия, по-видимому, обусловлены вынужденными колебаниями (в случае инжекции сильно нелинейными) магнитосферы при вариациях параметров солнечного ветра. Теоретически механизм радиальной диффузии заряженных частиц в магнитосфере Земли под действием импульсных возмущений магнитосферы, приводящий к увеличению энергии частиц по мере их перемещения внутрь магнитосферы, был предложен и разработан профессором НИИЯФ МГУ Б.А. Тверским. Магнитосфера защищает КА от воздействия солнечных и галактических космических лучей, но потоки электронов и протонов, находящиеся в магнитной ловушке внутри магнитосферы, представляют для КА большую угрозу.
На рис. 5, для первых 90 дней 2007 г., показана динамика интенсивности потоков электронов в диапазоне энергий 24,1 кэВ – 2000 кэВ, 13 энергетических каналов, данные спутника серии LANL на ГСО и временная структура скорости солнечного ветра (ссылки на базы данных NASA приведены на сайте www.d54x.ru в разделе «космическая погода»). На рис. 4 хорошо видна зависимость интенсивности потоков электронов на

геостационарной орбите от рекуррентных высокоскоростных потоков плазмы солнечного ветра.

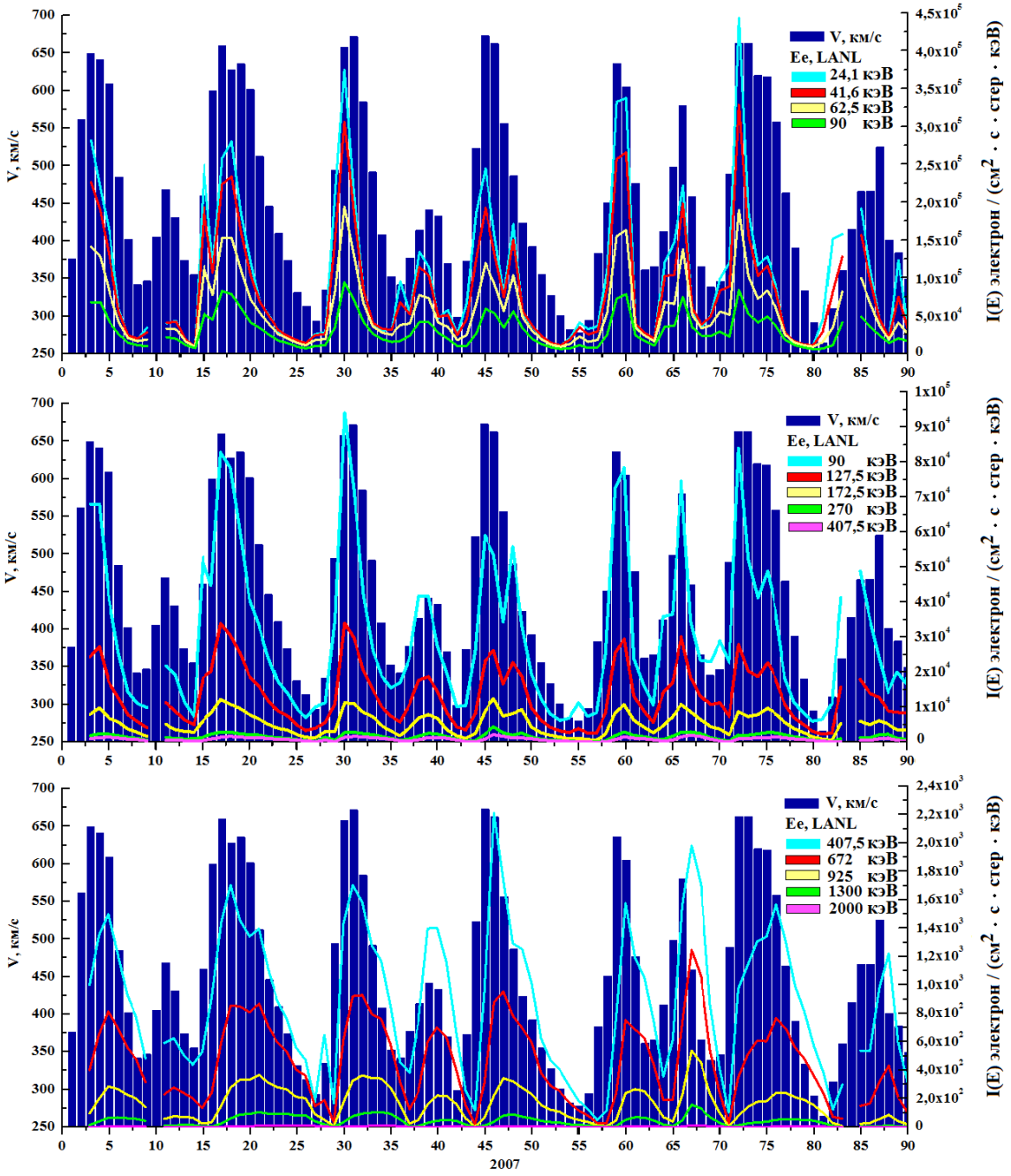


Рис. 5. Динамика потока электронов на геостационарной орбите для 13 энергетических каналов электронов от 24,1 кэВ до 2 МэВ и скорости плазмы солнечного ветра для первых 90 дней 2007 г [23].

При возрастании скорости солнечного ветра во внешней магнитосфере наблюдается увеличение интенсивности потока релятивистских электронов, максимум потока которых, обычно, запаздывает относительно максимума скорости солнечного ветра на несколько суток. На рис.6. приведена зависимость интенсивности потока электронов с энергией Ee > 0.6 МэВ (с учетом задержки 2-е суток) от величины скорости плазмы солнечного ветра. При столкновении потока плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли, часть кинетической энергии ветра, посредством цепочки различных физических процессов, частично трансформируется в кинетическую энергию частиц РПЗ. При увеличении

скорости солнечного ветра процессы ускорения частиц становятся более эффективными. Физических процессов, приводящих к ускорению заряженных частиц много, например, ускорение в индукционных электрических полях, ускорение на границе магнитосферы в сдвиговых течениях плазмы (механизм ускорения Бережко) и.т.д. Наиболее эффективное возрастание потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ наблюдается при взаимодействии магнитосферы Земли с рекуррентными высокоскоростными потоками солнечного ветра, в которых Bz – компонента межпланетного магнитного поля имеет отрицательное значение.

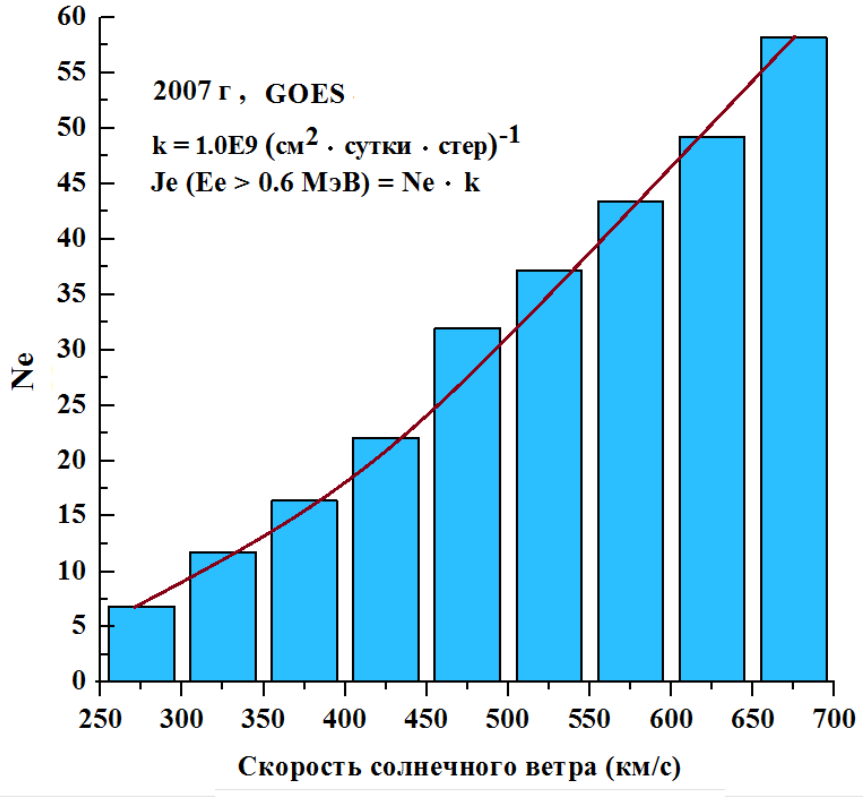


Рис.6. Распределение интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите в 2007 г. по значениям скорости солнечного ветра. Учитывалась задержка (двое суток) изменения интенсивности потока электронов относительно изменения скорости солнечного ветра [24].

На рис. 7, (а) представлена фотография Солнца в рентгеновских лучах, корональная дыра обведена красным. На рис. 7, (б) схематично показана струя быстрого солнечного ветра, вытекающая из корональной дыры. Вблизи минимума солнечной активности уровень турбулентности межпланетного магнитного поля (ММП) в высокоскоростном рекуррентном потоке (в струе) солнечного ветра может быть больше, чем в окружающем пространстве. По этой причине струя в межпланетном пространстве может создавать распространению частиц ГКЛ большее сопротивление, чем окружающая среда. Интенсивность потока частиц ГКЛ внутри струи будем меньше, чем за ее пределами. На рис. 6 схематично показано, что когда источник струи высокоскоростного потока

солнечной плазмы (в нашем случае корональная дыра) появляется на западной части диск Солнца, происходит взаимодействие магнитосферы Земли с этим потоком. При этом взаимодействии происходит деформация магнитосферы, что сопровождается геомагнитным возмущением, появлением индукционных электрических полей, перестройкой ионосферно-магнитосферной токовой системы, ускорением заряженных частиц, генерацией низкочастотного электромагнитного излучения, высыпанием заряженных частиц из РПЗ в ионосферу, разогрев верхней атмосферы, подъем атмосферы на большие высоты. В области аврорального овала заметное увеличение плотности атмосферы может ожидать до высот порядка 1000 км.

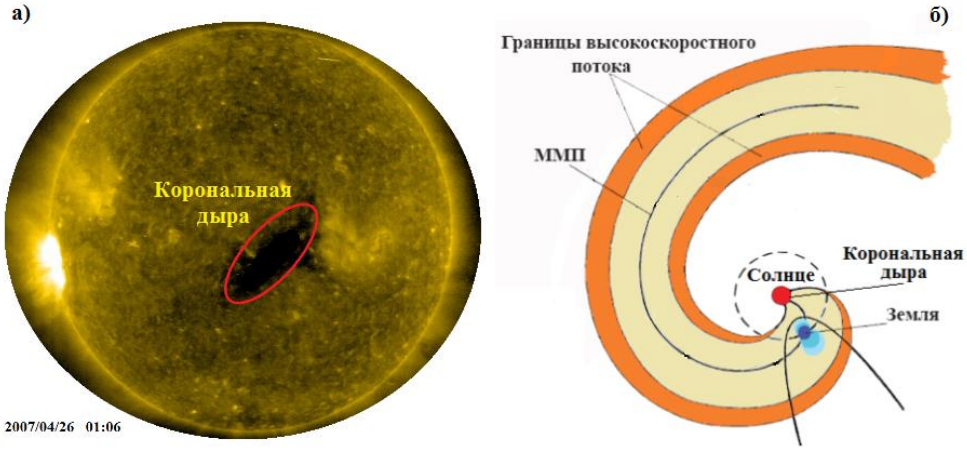


Рис.7. Схематично показано погружение магнитосферы Земли в струю рекуррентного (повторяющегося с периодом вращения Солнца) высокоскоростного потока солнечной плазмы, источником которого является корональная дыра.

Всплески интенсивности потока релятивистских электронов во внешней магнитосфере Земли есть отклик на периодические всплески скорости плазмы солнечного ветра. Периоды, с которыми повторялись всплески скорости солнечного ветра и интенсивности потока электронов во внешнем РПЗ, связаны с периодом вращения Солнца вокруг своей оси. Рассмотрим причину этого явления. Солнце газовый шар и разные его части вращаются с разной скоростью. Вещество Солнца на экваторе делает полный оборот вокруг оси за 25 суток, на средних широтах за 26 суток, вблизи полюсов за 35 суток. (см. рис. 8). Источником высокоскоростного рекуррентного (повторяющегося) потока солнечной плазмы является корональная дыра. Период повторяемости появления вблизи магнитосферы Земли быстрой струи потоков солнечной плазмы зависит от гелиошироты корональной дыры на Солнце, которая является источником струи плазмы.

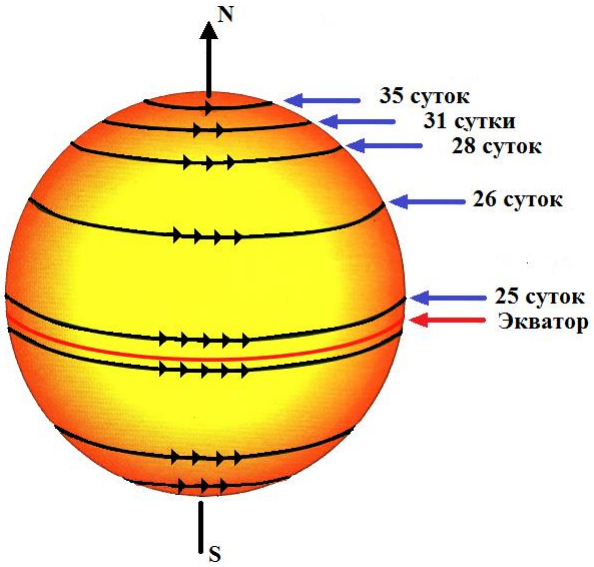


Рис.8. Рисунок иллюстрирует дифференциальное вращение Солнца, на разных широтах вещество Солнца вращается с разной угловой скоростью .

На рис. 9 приведены спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли и интенсивности потока релятивистских электронов на ГСО. В 2007 г. не было мощных солнечных вспышек и практически все значительные возрастания скорости солнечного ветра были струями плазмы из корональной дыр, которая в этот период находилась на средних широтах. Существенные изменения скорости солнечного ветра и интенсивности релятивистских электронов на ГСО наблюдались с периодом около 26 суток. Меньшие периоды (14 и 9 суток) относительно не большие возрастания скорости солнечного ветра, вероятно, связаны с секторными структурами межпланетного магнитного поля (ММП).

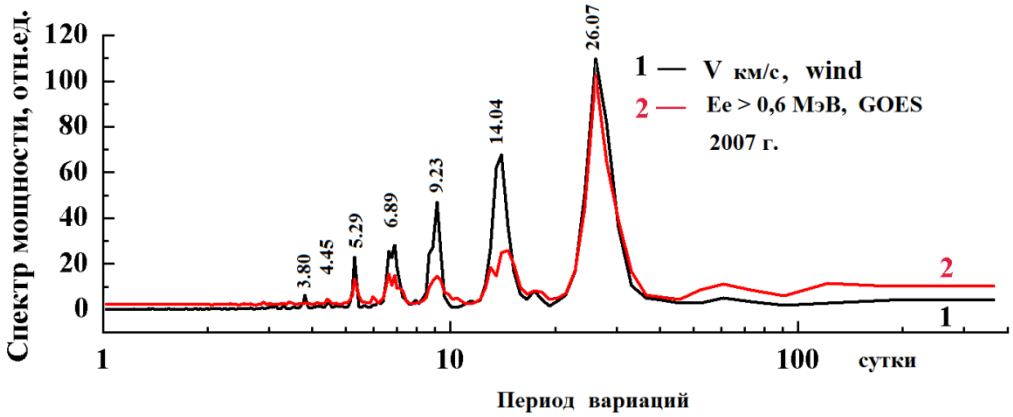


Рис.9. Спектры мощности флуктуаций (в относительных единицах) скорости плазмы солнечного ветра и интенсивности потока релятивистских электронов внешнего РПЗ за период с 1 января по 31 декабря 2007 г [24].

Для исследования периодических изменений параметров межпланетной среды и магнитосферы Земли, был выбран период с 1 января до 31 декабря 2007 г. Заметим, что 2007 г соответствует периоду спада 23 цикла солнечной активности, когда, на фоне угасающей солнечной активности, чётко проявляются струи высокоскоростных потоков плазмы из корональных дыр. Слева на рис. 10 приведены данные измерений параметров межпланетной среды, полученные космическим аппаратом ACE: скорости солнечного

ветра; плотности плазмы; температуры плазмы; Bx-компоненты ММП. Вверху справа представлены спектры мощности флуктуаций этих параметров в относительных единицах. Наибольшая мощность флуктуаций всех параметров наблюдается на частоте вращения Солнца (соответствующий период около 26 суток).

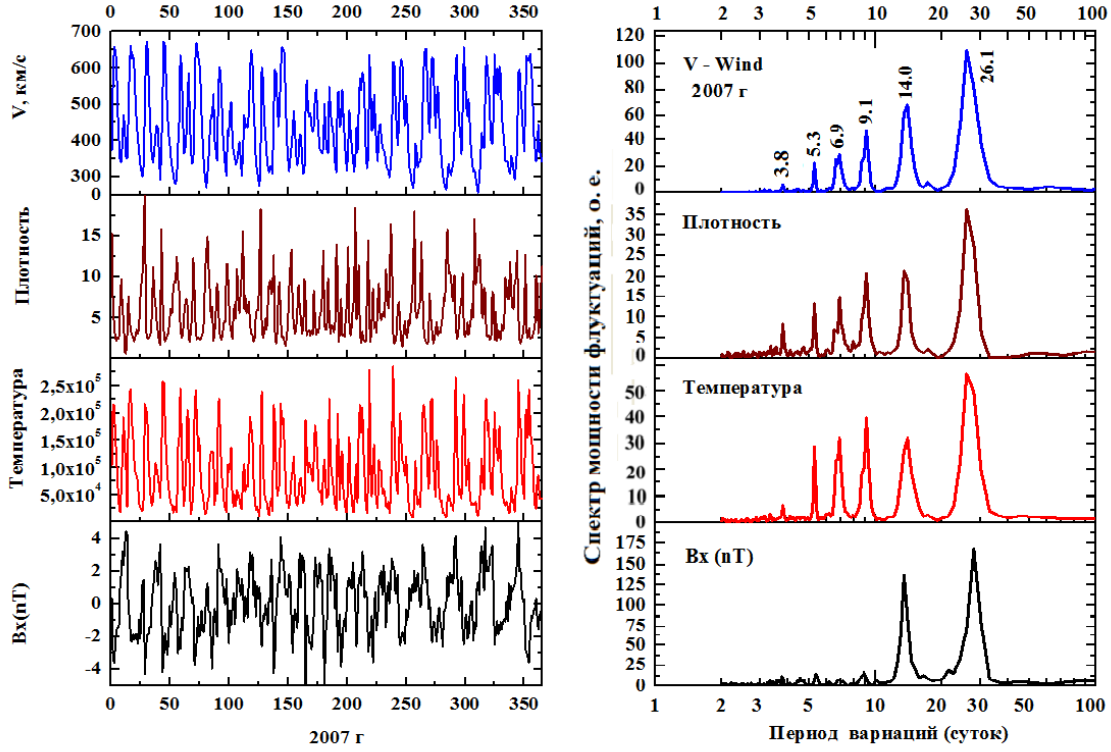


Рис. 10. Данные временных изменений параметров межпланетной среды в 2007 г; данные спектра мощности флуктуаций межпланетных и геомагнитных параметров, спектра мощности флуктуаций интенсивности потоков электронов на ГСО [26].

Слева на рис. 11 представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра; Кр-индекса геомагнитной активности, который характеризуют степень возмущённости геомагнитного поля (т. е. степень интенсивности «дрожания» силовых линий поля); Dst – индекса геомагнитной активности, который характеризует интенсивность электрического тока, протекающего в области магнитного экватора вокруг Земли, на расстоянии нескольких земных радиусов от её поверхности; интегрального потока электронов (с энергией более 0,6 МэВ) на ГСО. Справа на рис. 11 представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра; дифференциальных потоков электронов с энергией 625 и 925 кэВ; интегрального потока протонов галактических космических лучей (ГКЛ) с энергией более 100 МэВ. Из данных, приведённых на рис. 11, следует, что максимальная мощность флуктуаций параметров межпланетной среды и геомагнитосферы, а также мощность флуктуаций интенсивность потока частиц ГКЛ сосредоточена на частоте вращения Солнца.

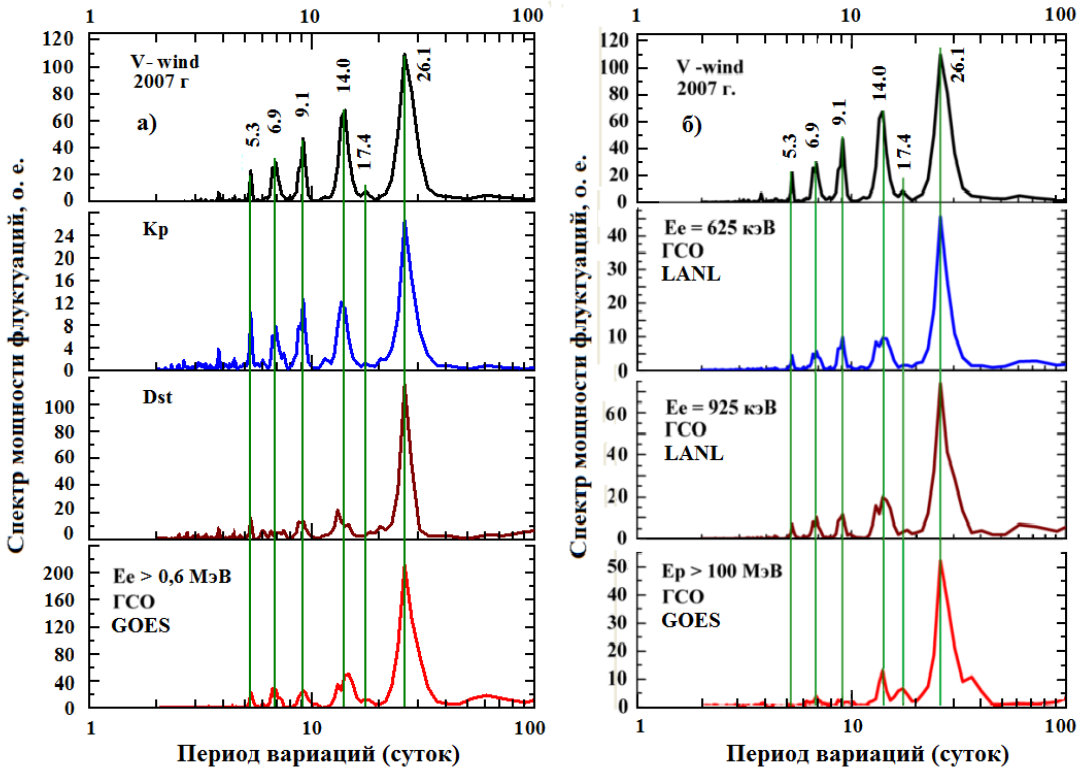


Рис. 11. Данные спектра мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и интенсивности потоков электронов на ГСО и протонов ГКЛ с энергией более 100 МэВ, зарегистрированных на ГСО [26].

На рис. 12 приведена спектральная мощность флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и продолжительности суточных риометрических поглощений по данным 1995 г. (п. Тикси). Риометрические данные подтверждают, что в 1995г. высыпания электронов происходили с периодом около 26 суток. Заметим, что 1995 г приходится на спад 22 цикла солнечной активности, 2007 г также приходится на спад солнечной активности только 23 цикла [27]. Эти периоды характеризуются, тем, что была низкая вспышечная активность Солнца, но существовали мощные рекуррентные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, источником которых были корональные дыры. Струя высокоскоростного потока плазмы наносила удар по магнитосфере Земли с периодом равным периоду вращения Солнца.

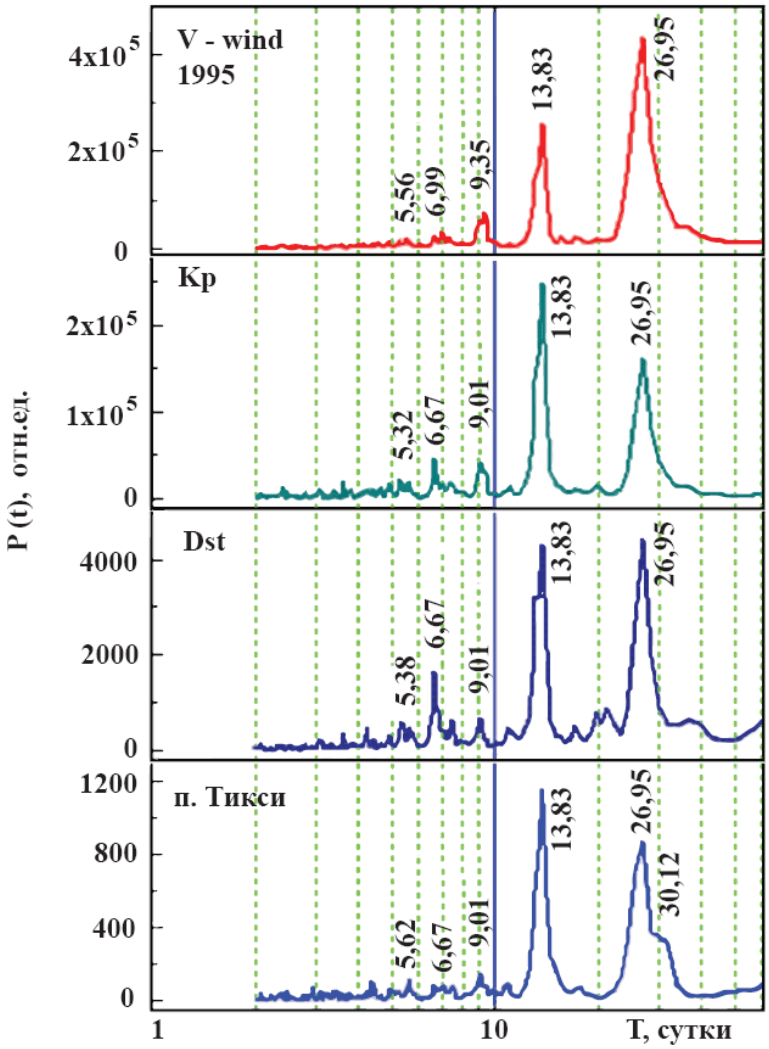


Рис. 12. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и продолжительности суточных риометрических поглощений по данным 1995 г (п. Тикси) [25]

Из анализа выше приведенных экспериментальных данных можно сделать вывод, что на спаде солнечной активности вблизи минимума вспышечной активности Солнца в спектрах вариаций параметров межпланетной среды, магнитосферных параметров, вариации плотности атмосферы на солнечно-синхронных орбитах, вариации интенсивности потоков ионизирующих излучений на орбитах космических аппаратов в магнитосфере Земли присутствовала частота вращения Солнца. Связь периодичности изменения параметров межпланетной среды и магнитосферы с частотой вращения Солнца может быть использована при разработке методики их прогноза.
НАСА, после 11 лет планирования и подготовки Radiation Belt Storm Probes (RBSP), 30 августа 2012 запустила два идентичных космических аппарата, оснащенных уникальной научной аппаратурой для исследования радиационных поясов. Орбиты RBSP проходят через внутренние и внешние радиационные пояса. RBSP собирает данные о частицах, электромагнитных волнах, электрических и магнитных полях. Эти данные должны обеспечивать беспрецедентное понимание того, как развиваются радиационные пояса во времени и пространстве. Общая цель RBSP - понять, в идеале на уровне предсказуемости, как радиационные пояса меняются в зависимости от динамических воздействий, исходящих от Солнца. Для этого потребуется детальное

понимание механизмов ускорения частиц, потерь частиц, процессов переноса частиц во внутренней магнитосфере.
Важным аспектом миссии RBSP является изучение экстремальные явления космической погоды, а именно экстремальные условия в космической среде, окружающей Землю, которые могут создать угрозу, как для спутниковой электроники, так и для космонавтов. Данные RBSP будут использоваться инженерами для проектирования радиационно-стойких космических аппаратов и позволит синоптикам предсказывать явления космической погоды, чтобы предупреждать космонавтов и операторов, космических и наземных технологий, о потенциальной опасности. В 2012 году произошла техническая революция, в технологии исследования РПЗ. Обзор основных работ до 2012 года [28-30] и после, (практически все научные работы по миссии RBSP до 2020 г) [31].

ЧАСТИЦЫ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Источниками частиц солнечных космических лучей (СКЛ) являются хромосферные солнечные вспышки. Солнечные вспышки можно рассматривать как релаксационный процесс, который сопровождается аннигиляцией магнитного поля накопленной в области солнечных пятен, трансформацией энергии магнитного поля в энергию индукционного электрического поля с последующим процессом ускорения заряженных частиц [32-35]. Вспышка на Солнце была впервые зарегистрирована Кэррингтон и не зависимо Ходжсон. Кэррингтон и Ходжсон, наблюдая за солнечными пятнами, 1 сентября 1859 обнаружили в области солнечных пятен появление яркого белого пятна не правильной формы, Спустя несколько часов, на Земле произошла мощная геомагнитная буря. Полярные сияния наблюдались даже на низких широтах. Эта была самая мощная вспышка из всех, что мы знаем.
К типичной солнечной вспышки средней мощности можно отнести протонную вспышку (1B/X2), которая произошла в 23.36 UT 07.12.1982 на западном лимбе Солнца в области с координатами S19 W86. Потоки частиц СКЛ были зарегистрированы аппаратурой автоматической межпланетной станции (АМС) «Венера-13» и «Венера-14», которые в тот момент находились на расстоянии ≈0,8 а. е. от Солнца, на 47° западнее линии Солнца – Земля. На рис. 13 приведен временной профиль интенсивности потоков СКЛ от вспышки по данным АМС «Венера-13». Временной профиль интенсивности частиц СКЛ до прихода межпланетной ударной волны (МУВ) обусловлен их диффузионным распространением в невозмущенном солнечном ветре, преимущественно вдоль межпланетного магнитного поля (ММП). После 06.00 UT 09.12.1985 профиль интенсивности потока СКЛ существенно изменился.

Фронт ударной волны от вспышки (1B/X2) 07.12.1982 был зарегистрирован 11.00 UT 09.12.1982 по увеличению напряженности ММП и характеризовался 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. Основной поток частиц СКЛ пришел за период от момента вспышки до прихода ударной волны.

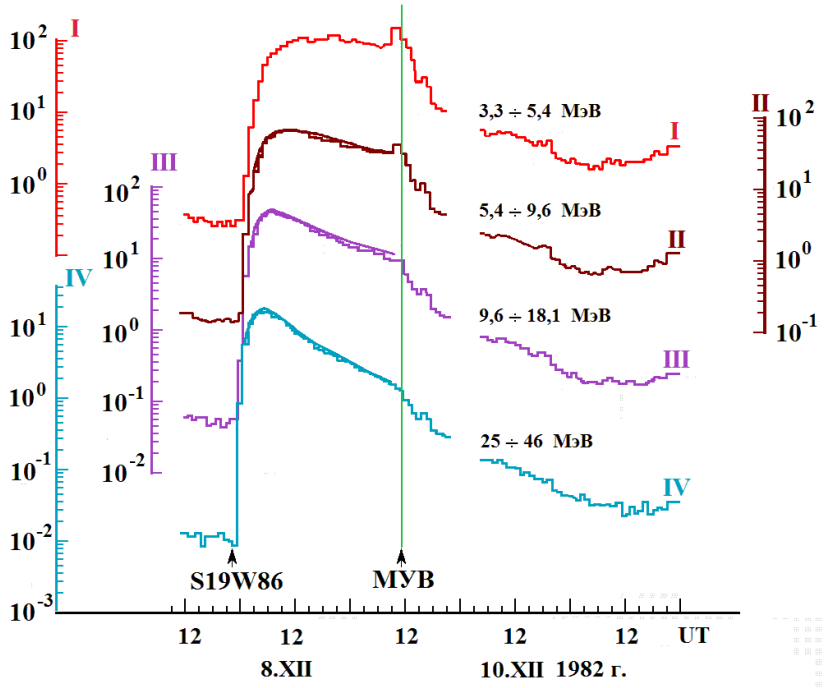


Рис. 13. Потоки частиц СКЛ от солнечной вспышки 07.12.1982, зарегистрированные на АМС «Венера-13» [25].

На рисунке 14 показаны интегральные потоки частиц СКЛ на орбите Луны от мощных солнечных вспышек, которые наблюдались с 19 по 22 цикл активности Солнца .

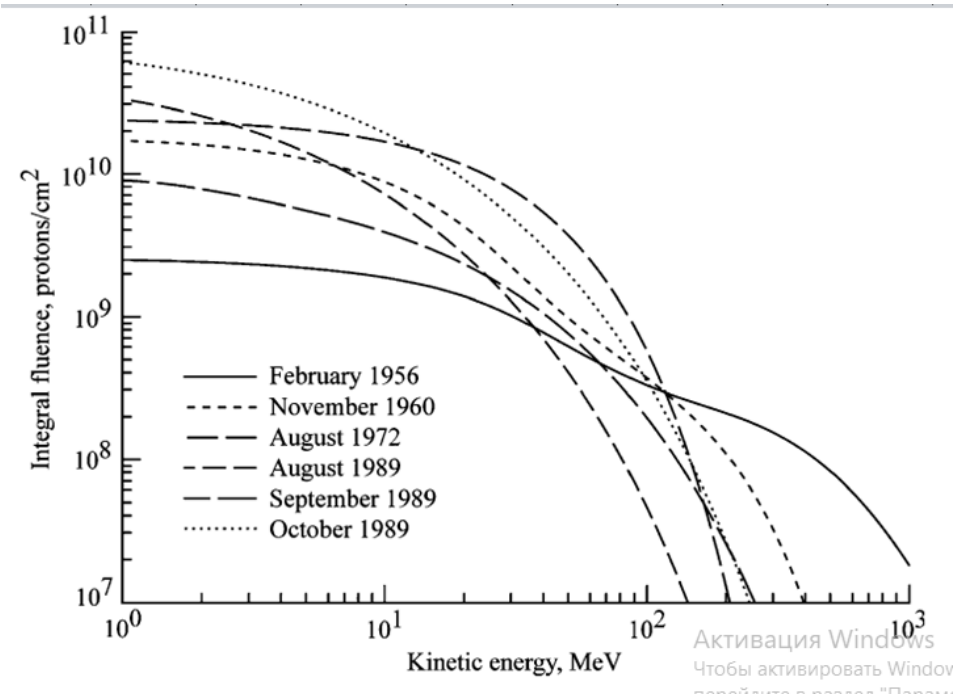


Рис . 14. Энергетические спектры интегральных (за вспышку) потоков заряженных частиц СКЛ на орбите Луны для шести мощных солнечных вспышек [36, 37].

Любая из вспышек, перечисленных на рисунке 14, могла бы привести к тому, что космонавты, находящиеся на поверхности Луны, получили бы достаточно большие дозы радиации. Но следует отметить, что не все вспышки на Солнце являются источником

частиц СКЛ, способных представлять угрозу для КА и космонавтов. Количество солнечных вспышек за 11-ти летний цикл солнечной активности (СА) составляет величину порядка нескольких десятков тысяч. В максимуме СА вспышки могут происходить с интервалом менее двух часов. Большинство вспышек сопровождаются потоками частиц СКЛ с энергиями менее 1 МэВ, протоны с такой энергией не способны даже преодолеть защиту из алюминия толщиной 0,005 г/см$^{2.}$. В максимуме активности Солнца в среднем ожидается одна вспышка в неделю с потоками частиц СКЛ, максимальная энергия которых для ядер химических элементов может достигать 10 МэВ/нуклон и для электронов – 1 МэВ. Пробег протонов с энергией 10 МэВ в алюминии менее 0,2 г/см^2. Однако один раз в месяц могут быть вспышки, максимальная энергия частиц СКЛ в которых может достигать 100 МэВ/нуклон для ядер и около нескольких МэВ для электронов.

Пробег протона с энергией 100 МэВ в алюминии составляет 10 г/см^2. Один раз в год, возможно, будут вспышки, максимальные энергии частиц СКЛ в которых могут достигать 1 ГэВ/нуклон для ядер и несколько десятков МэВ для электронов. Пробег протона с энергией 1 ГэВ в алюминии составляет 400 г/см^2. За весь 11-летний цикл СА число сверхмощных солнечных вспышек, в которых максимальная энергия частиц СКЛ может достигать 10 ГэВ/нуклон для ядер и 100 МэВ для электронов, не более трёх. Пробег протона с энергией 10 ГэВ в составляет величину 5000 г/см^2 За 11 лет возможна одна вспышка, в которой максимальная энергия частиц СКЛ может достигать величины порядка 100 ГэВ/нуклон для ядер и 500 МэВ для электронов. На рисунке 15 приведен сглаженный график числа солнечных пятен в 19, 20 и 21 циклах солнечной активности. Вертикальные линии обозначают интегральные за вспышки потоки частиц СКЛ с энергией более 30 МэВ. Из данных приведенных на рисунке 15 следует, что мощные солнечные вспышки не бывают в минимуме солнечной активности.

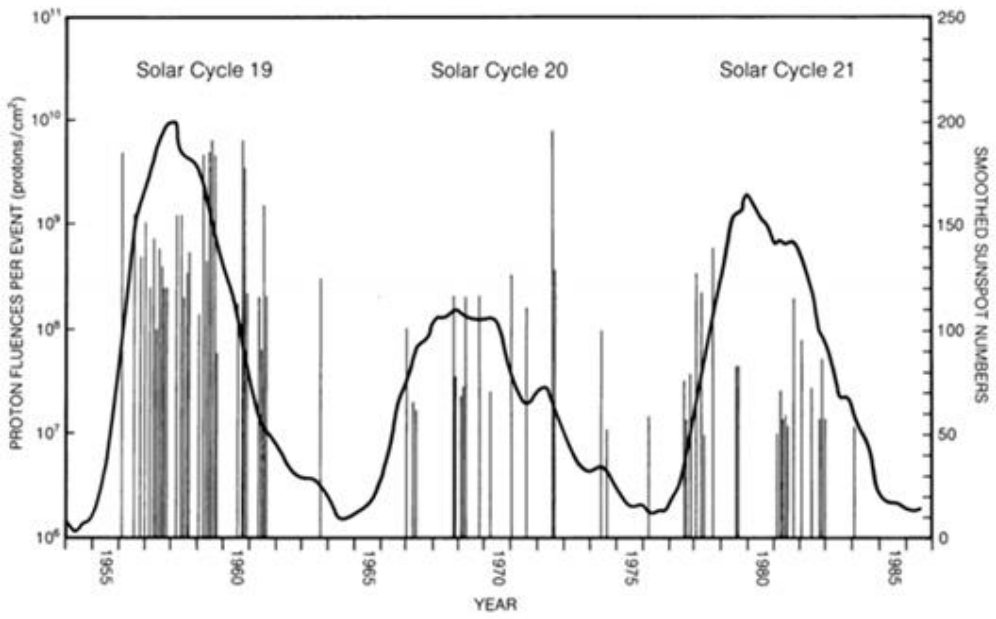


Рис. 15 Вертикальные линии обозначают интегральные за вспышки потоки частиц СКЛ с энергией более 30 МэВ. Кривая показывает сглаженное число солнечных пятен, показатель уровня солнечной активности за три 11-летних солнечных цикла. [38]

На рисунке 16 приведен пример поглощенных доз радиации от двух мощных солнечных вспышек 11.05.1959 и 12.11.1960 г [38]. Обозначение: протоны - p СКЛ, плюс вторичные протоны- p2, нейтроны-n и гамма- излучение, для события 12.11.1960 дополнительно приведена полная суммарная доза от вторичного излучения - сигма. Обратите внимание, что поток частиц СКЛ от вспышки 11.05.1959 г содержал большое количество релятивистских электронов, доза радиации от тормозного излучения электронов даже за защитой 20 г/см^2 Al составила величину 10 рад за вспышку. В потоке частиц СКЛ от солнечной вспышки 12.11.1960 в основном преобладали протоны высоких энергий, даже под экраном из алюминия массовой толщиной 30 г/см2 поглощенная доза радиации достигала величины 10 рад за вспышку.

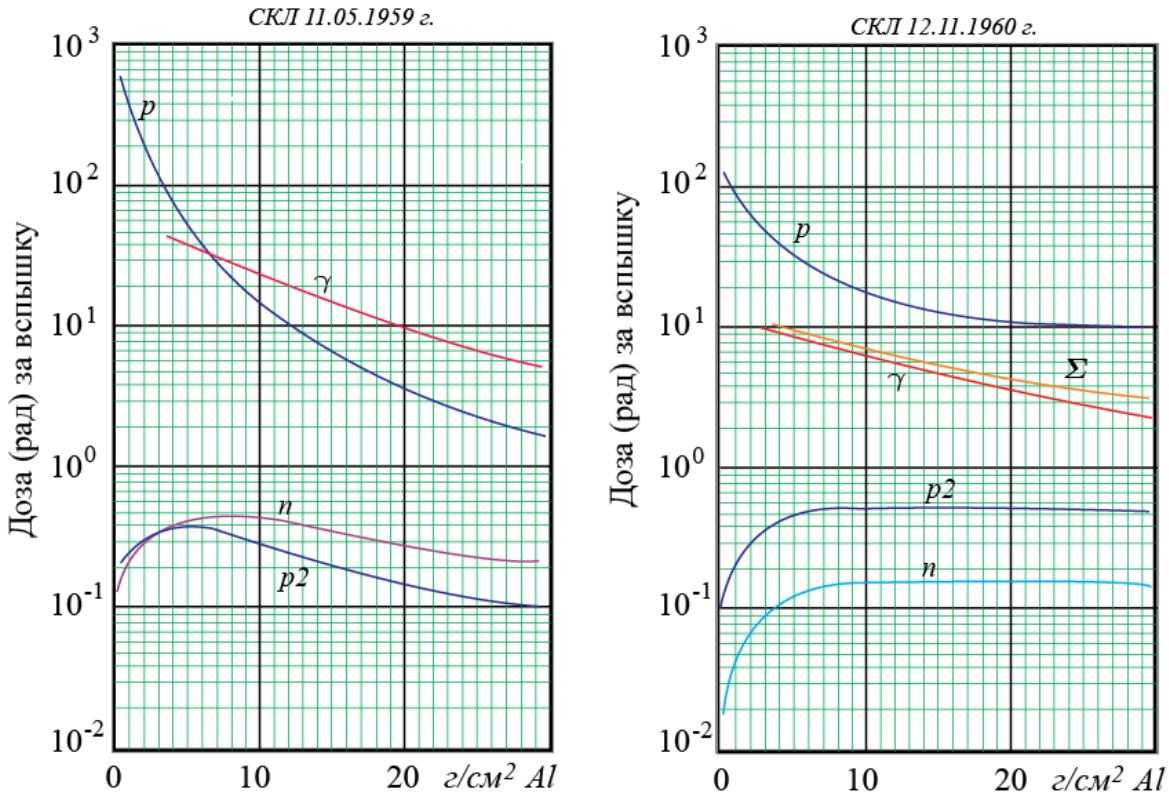


Рис. 16. Зависимость полной поглощенной дозы радиации, создаваемой за экраном из алюминия первичными протонами СКЛ (солнечные вспышки 11.05.1959 и 12.11.1960) и вторичными частиц (гамма –излучением, протонами и нейтронами) от массовой толщины защитного экрана [39].

На рисунке 17 показана временная зависимость мощности эквивалентной дозы на поверхности Луны от сверхмощной солнечной вспышки 2 августа 1972 года, за различными защитными экранами из алюминия. Интегральный поток СКЛ от вспышки показан на рисунке 14. Это событие произошло между миссиями Аполлона 16 и 17 , если бы астронавты в этот период были на Луне, то возможно, был бы летальный исход.

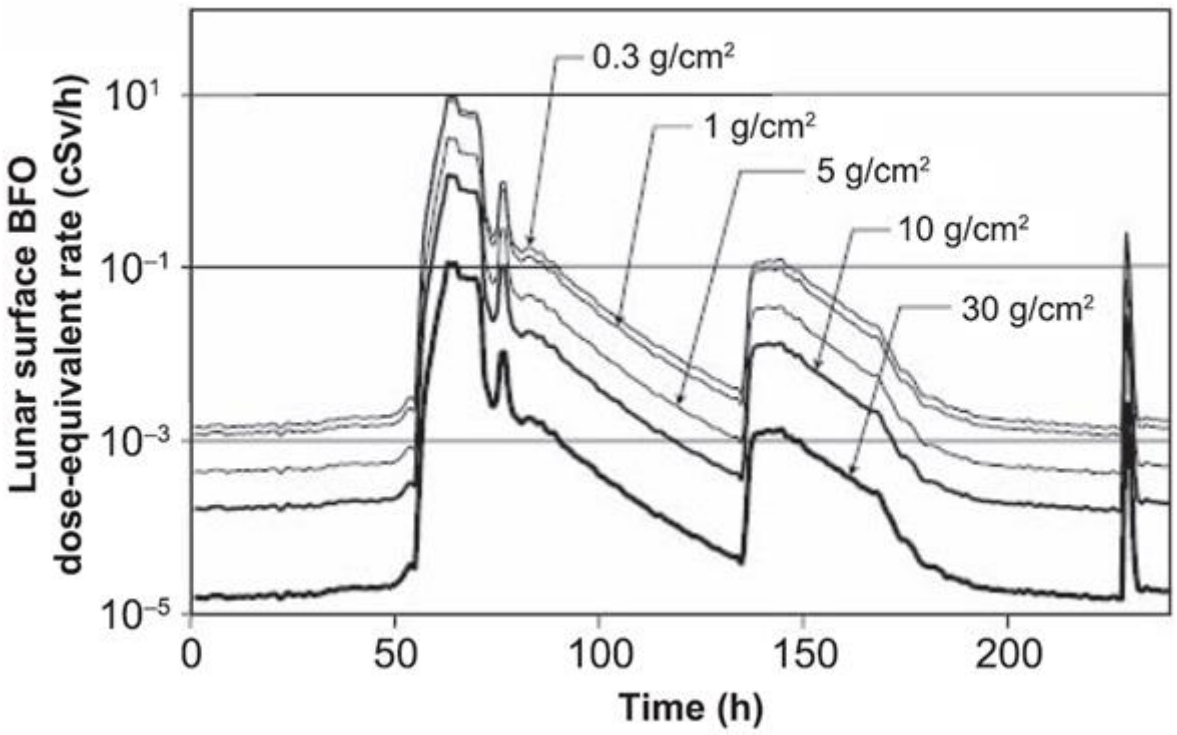


Рис. 17. Временная зависимость мощности эквивалентной дозы на поверхности Луны от сверхмощной солнечной вспышки 2 августа 1972 года, за различными защитными экранами из алюминия. Это событие произошло между миссиями Аполлона 16 и 17 [37].

На орбите и вблизи поверхности Луны радиационная среда представляет собой сложную смесь радиационных частиц, в которых заряженные частицы с высокой проникающей способностью от Солнца и источников вне солнечной системы представляют реальную опасность для космических лунных миссий. Изучение и постоянный мониторинг солнечной активности может позволить надежно прогнозировать временные окна с низким уровнем радиации для лунных миссий, Возможно создание укрытий под лунным грунтом на глубине нескольких метров либо в пещерах. В любом случае потребуется техника, способная работать в космосе. Частицы СКЛ представляют серьезную опасность для космонавтов за пределами магнитосферы Земли. В настоящее время в мире уделяется большое внимание онлайн-мониторингу и прогнозированию радиационных условий в межпланетном пространстве, на поверхности Луны и Марса. Информация о радиационных условиях в межпланетной среде, на поверхности Луны и Марса поступает почти в реальном режиме времени (с учетом задержки сигнала).
Для сбора информации о радиационных условиях задействованы современные технические комплексы: марсианской лаборатории (*Mars Science Laboratory*-MSL), лунного разведывательного орбитального аппарата (*Lunar Reconnaissance Orbiter - LRO*).
Для прогнозирования межпланетной радиационной обстановки в США используется онлайн-система PREDICCS. Во-первых, PREDICCS использует измерения протонов СКЛ в режиме, близком к реальному времени, с помощью различных инструментов в зависимости от лет эксплуатации. Для пяти солнечных событий 2012 года (см. рис. 18) в этом исследовании PREDICCS использовала измерения протонов с помощью набора инструментов под названием EPS / HEPAD (датчики энергетических частиц / высокоэнергетический детектор протонов и альфа) на борту геостационарного

оперативного спутника окружающей среды-13 (GOES-13). EPS измеряет протоны в семи энергетических каналах в диапазоне от 0,7 МэВ до 900 МэВ. HEPAD измеряет протоны в четырех энергетических каналах в диапазоне от 330 МэВ до более 700 МэВ.

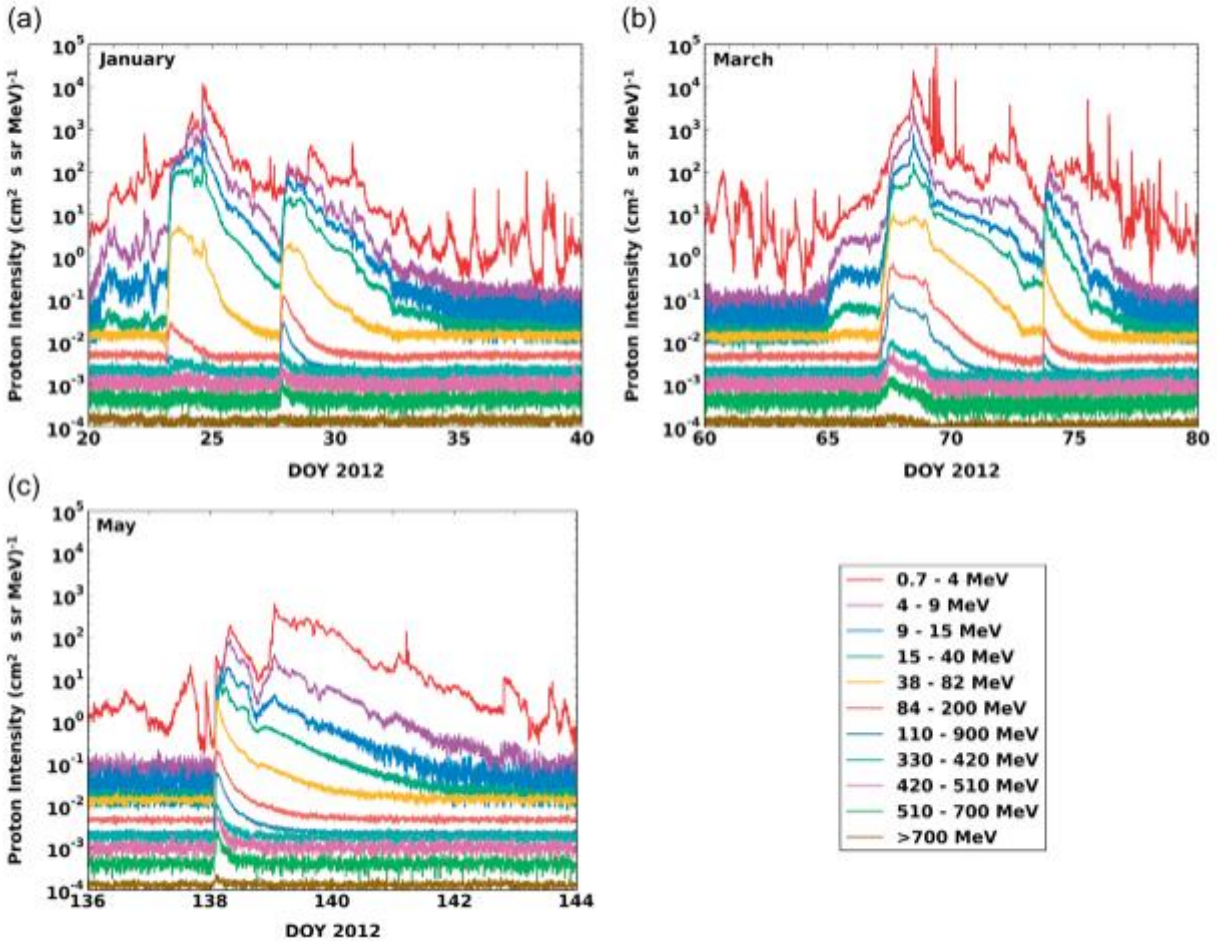


Рис. 18 . Пятиминутные средние значения интенсивности протонов , измеренные спутником GOES-13 / EPS / HEPAD во время пяти солнечных событий в январе, марте и мае 2012 года [40]. DOY - *Day of Year*, EPS- *Energetic Particle Sensors*, HEPAD - *High Energy Proton and Alpha Detector.*

Для 5 солнечных вспышек, которые наблюдались с января по май 2012 г. (две вспышки в январе, две в марте и одна в мае), была определена мощность поглощенной дозы радиации. Мощность дозы полученная для кремния была пересчитана на мощность дозы для воды. Интенсивность потоков частиц ионизирующего излучения измерялась в около Земном пространстве, геостационарным КА GOES1-13 (см. рис. 18). Мощность дозы радиации измерялась детектором радиационной оценки (RAD) во время полета марсианской научной лаборатории (MSL) к Марсу (рис.19).

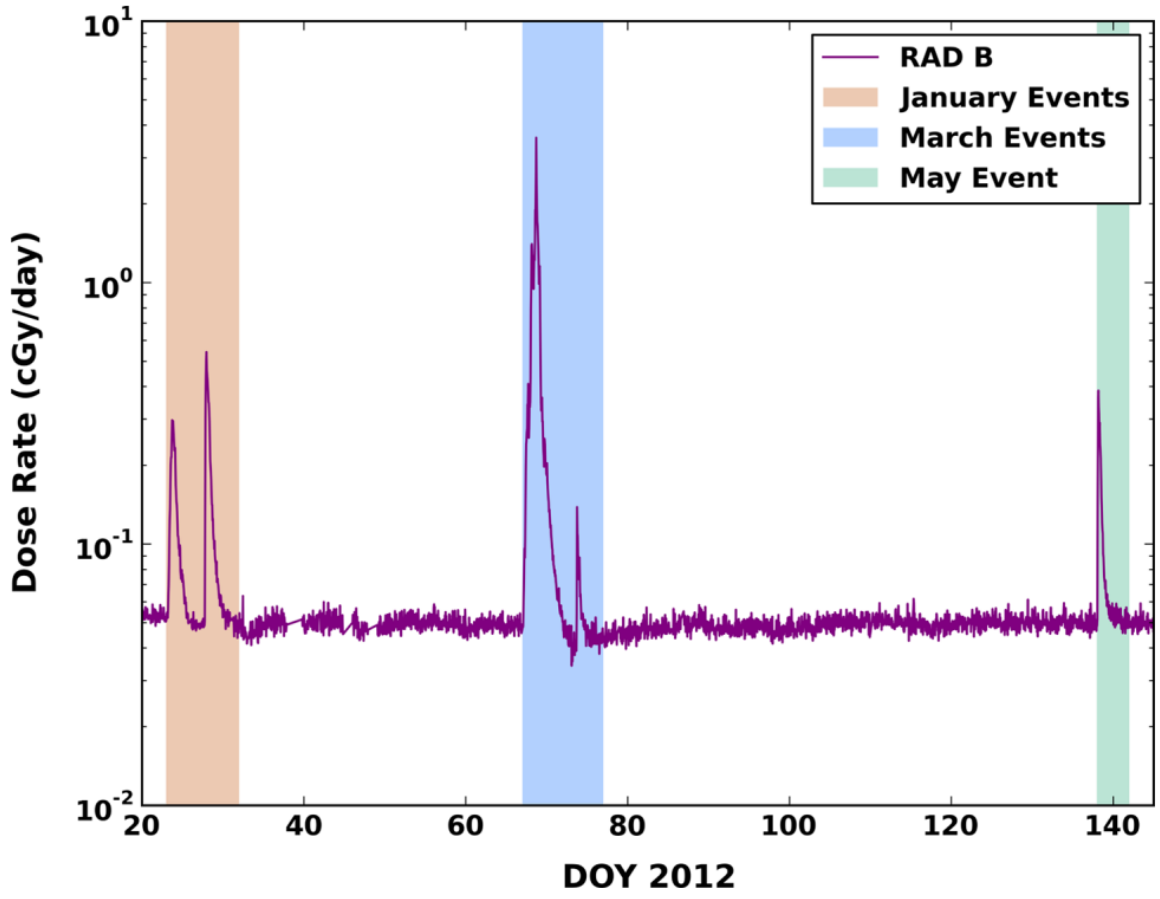


Рис. 19. Мощность дозы измерялась детектором «B» RAD (поглощающее вещество кремний) во время полета MSL к Марсу в 2012 году, затем полученная доза в кремнии была пересчитана на дозу в воде [40]. DOY - *Day of Year*, MSL - *Mars Science Laboratory*, RAD - *Radiation Assessment Detector*.

Доза – это энергия, выделяемая излучением в единице массы вещества. Единица измерения поглощенной дозы Грей в системе СИ (1 Гр=1 дж/кг; 1 сГр =1 рад; 1 рад=100 эрг/г;).

Прибор CRaTER на борту лунного разведывательного орбитального аппарата (LRO) характеризует лунную радиационную среду. Основу CRaTER составляет два кремниевых твердотельных детектора D1-D2 (тонкий и толстый), предназначенных для измерения эффектов ионизационных потерь энергии в веществе частицами СКЛ и ГКЛ. Для преобразования дозы в кремнии в дозу в воде, доза в кремни умножалась на 1.45. Мощность фоновых доз от частиц ГКЛ, наблюдаемых CRaTER на Луне во время солнечных событий в январе, марте и мае 2012 года составляли величину 0.0213 сГр/день, 0.0203 сГр /день и 0.0199 сГр /день соответственно.

Прибор RAD на борту марсохода Curiosity, который находился на к осмическом корабле во время полета MSL к Марсу, измерял дозу излучения двумя детекторами. Кремниевый детектор в основном был чувствителен к заряженным частицам, тогда как пластмассовый детектор в основном был чувствителен к нейтронам. Подобно двум детекторам CRaTER, мощность дозы RAD умножалась на 1.45, чтобы преобразовать дозу в кремнии в дозу в воде. Мощность фоновой дозы, измеренная детектором «B» RAD из-за источника питания MSL, составляет примерно 0.0085 сГр / день, это значение вычиталось из мощности дозы фона из всех измерений детектора «B»

RAD. Мощность фоновой дозы ГКЛ, измеренной детектором «B» RAD (после преобразования в мощность дозы в воде), была 0.0481 сГр/день ± 0.0080 сГр/день.

На рис.20 показан радиальный градиент максимальной мощности поглощенной дозы от частиц СКЛ между Землей и Марсом. Значение дозы приведены за различными защитными экранами из алюминия. Радиальный градиент дозы определялся для периода, когда Земля и Марс находились на одной и той же магнитной силовой линии межпланетного магнитного поля.

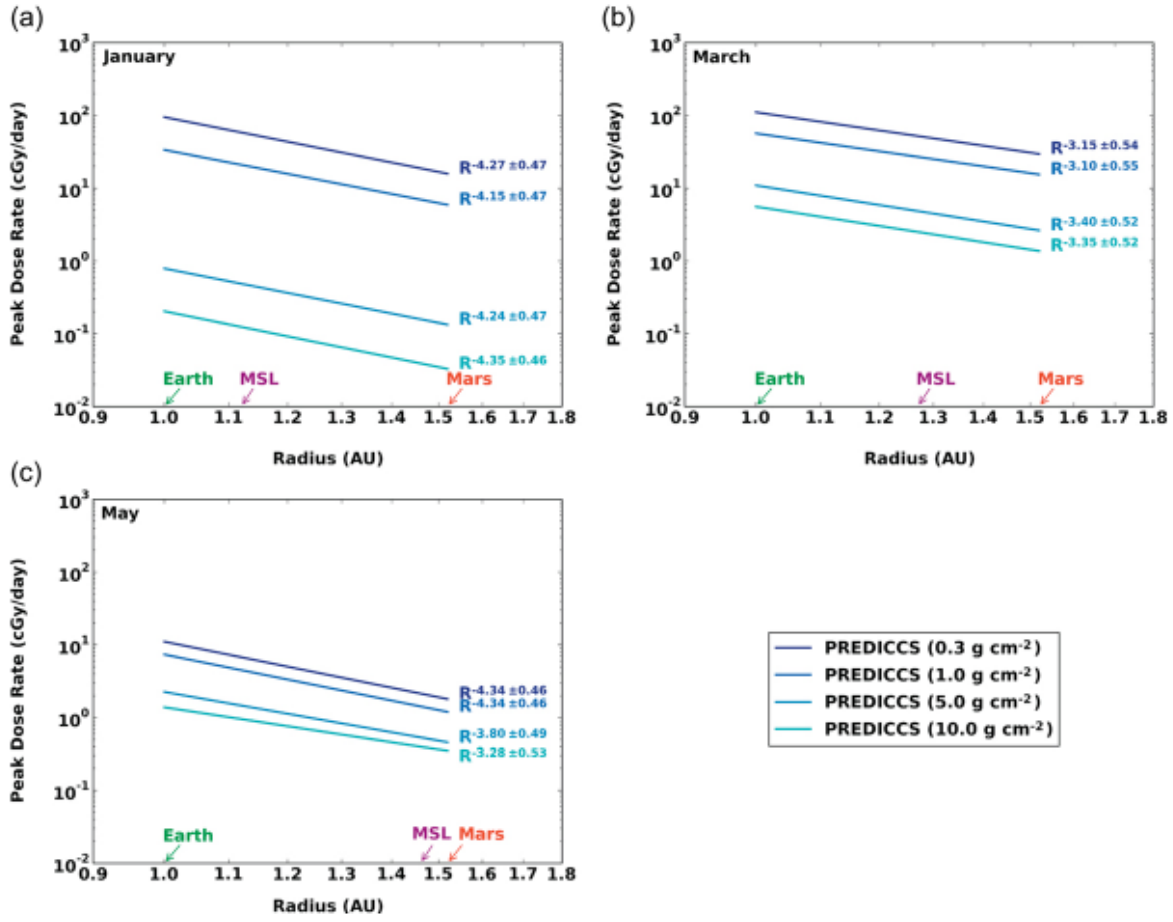


Рис. 20. Радиальный градиент максимальной мощности дозы между Землей и Марсом. Доза за экранами из алюминия массовой толщиной : 0.3 г/ см^2 , 1.0 г/см^2 , 5.0 г/см^2 , и 10.0 г/см^2. Внизу показаны радиальные местоположения Земли (зеленый), MSL - *Mars Science Laboratory* (фиолетовый) и Марса (красный)[40].

На примере потоков СКЛ от 5 солнечных вспышек, которые наблюдались в январе, марте и мае 2012 года, показана эффективность защитных экранов из алюминия для уменьшения дозовых нагрузок (см. рис.21).
На рис. 21приведены часовые усредненные значения мощности дозы для январского события (a), для мартовского события (b) и майского события (c). Мощность дозы за различными защитными экранами была масштабирована для местоположения MSL (1.12 а.е., 1.27 а.е. и 1.46 а.е., соответственно).

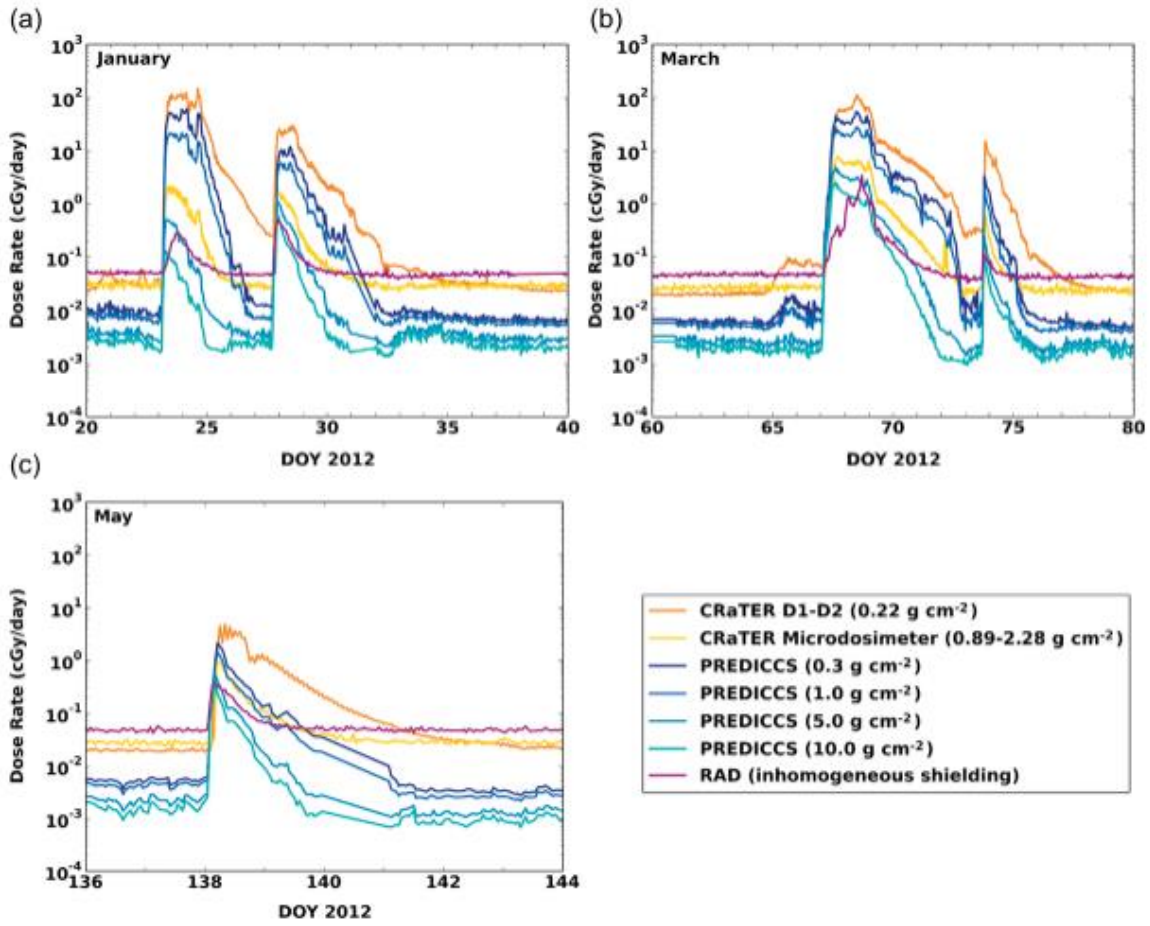


Рис. 21. Приведены часовые усредненные значения мощности дозы для январского события (a), мартовского события (b) и майского события (c). Мощность дозы от частиц СКЛ за различными экранами была с помощью PREDICCS масштабирована для местоположения MSL (1.12 a.e., 1.27 a.e. и 1.46 a.e., соответственно). Нужно иметь ввиду, что на поверхности Луны, где половина неба закрыта Луной, мощность фоновой дозы CRaTER меньше, чем RAD почти в 2 раза, кроме разницы из-за удаленности от Солнца [40]. MSL - *Mars Science Laboratory,* CRaTER - *Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation,* RAD - *Radiation Assessment Detector.*

Измерения CRaTER производятся на высоте над лунной поверхностью, где менее половины неба закрыто Луной. Чтобы скорректировать измерения для поверхности Луны, где половина неба закрыто Луной, мощность дозы умножается на $F = 1/(1+\sqrt{b})$; где $b= 1- [R/(R+h)]*[R/(R+h)]$; h – высота детекторов CRaTER над лунной поверхностью и R - радиус Луны. На рисунке 22 показаны величины накопленной доза, рассчитанной с помощью PREDICCS в зависимости от толщины алюминиевой защиты для событий января, марта и мая. Экранирование датчиков RAD (примерно 16 г/см^2), находится за пределами самого большого экранирования, которое учитывается PREDICCS (10 г/см^2), степенной закон соответствует предсказаниям PREDICCS. Математическая форма каждого степенного закона приведена в нижнем левом углу. Детектор RAD измерил значения накопленной поглощенной дозы 0.61 сГр-экв, 2.94 сГр-экв и 0.17 сГр-экв для событий января, марта и мая соответственно.

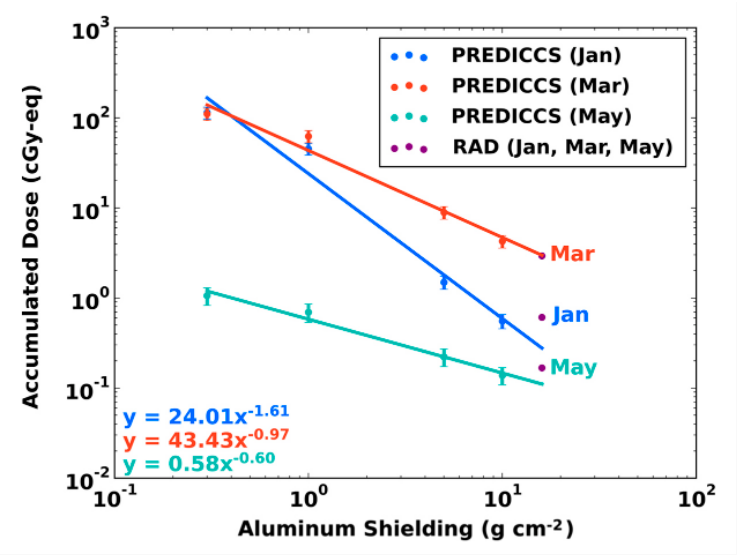
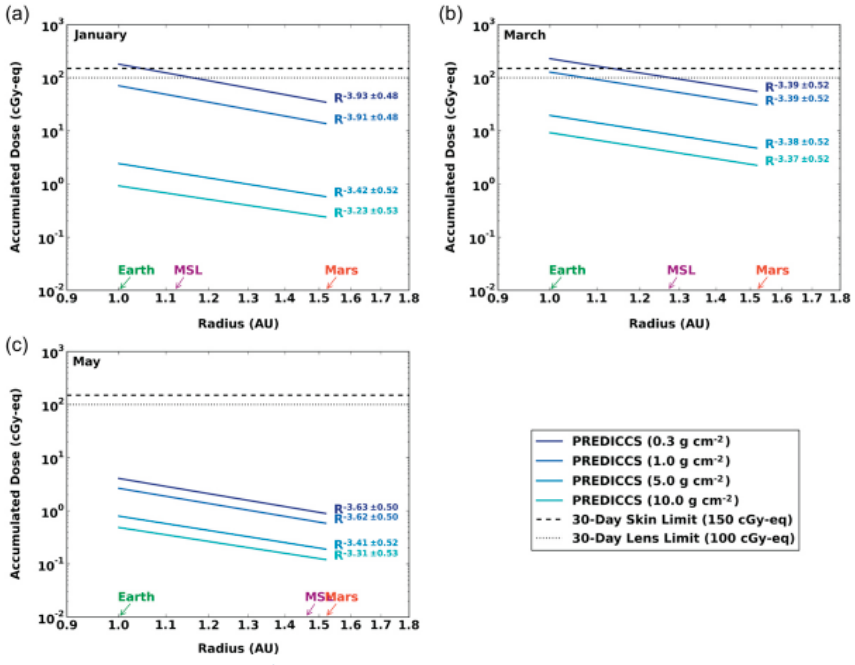


Рис.22. Накопленная доза, рассчитанная PREDICCS, как функция алюминиевой защиты для январских событий (синий), мартовских событий (красный) и майских событий (зеленый). Степенный закон (сплошные линии) соответствует предсказаниям PREDICCS. Доза, накопленная прибором RAD (фиолетовые точки) показана для каждого события (метки справа от каждой точки) при среднем экранировании примерно 16 г/см^2 . В нижнем левом углу находятся математические формы прогнозов PREDICCS. RAD - *Radiation Assessment Detector.*



На рис.23 показан радиальный градиент накопленной поглощенной дозы от частиц СКЛ между Землей и Марсом. Значение дозы приведены за различными защитными экранами из алюминия. Радиальный градиент накопленной дозы определялся для периода, когда Земля и Марс находились на одной и той же магнитной силовой линии межпланетного магнитного поля. MSL - *Mars Science Laboratory.*

На рисунке 23 показана радиальная зависимость накопленной дозы вдоль межпланетного магнитного поля от частиц СКЛ для событий января, марта и мая.

Следует отметить, что если миссия полета к Луне и нахождение на Луне будет происходить вблизи минимума солнечной активности, то выше приведенные значения дозовых нагрузок от частиц СКЛ можно считать верхним пределом. Реальные дозовые нагрузки от частиц СКЛ, в этот период, будут меньше.

ЧАСТИЦЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

ГКЛ обычно возникают в результате взрывов сверхновых в галактике [41], распространяясь в гелиосфере, приводят к умеренной, но постоянной мощности фоновой дозы в радиационной среде Земля-Луна. Интенсивность фона ГКЛ меняется в зависимости от солнечной активности - становится наибольшей около солнечного минимума и наименьшей около солнечного максимума.

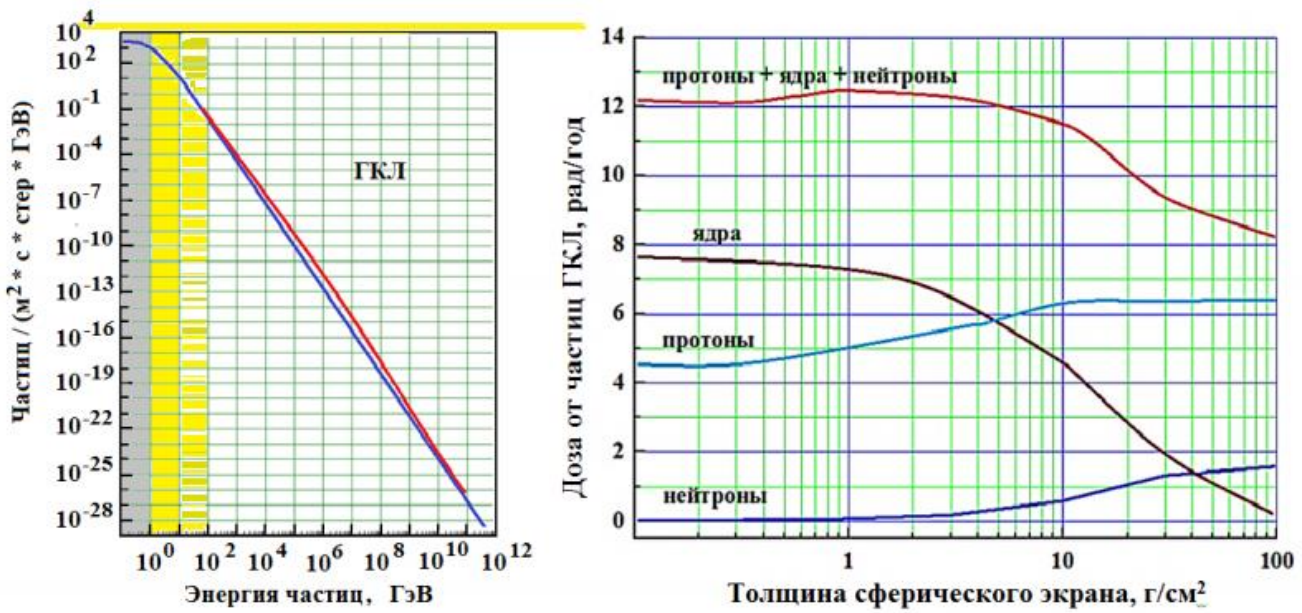


Рис.24 . Слева показан дифференциальный энергетический спектр частиц ГКЛ в области высоких энергий (красная линия), синяя линия представляет собой некую кривую, к которой стремится спектр частиц в области энергий меньше 10^6 и в области больше 10^6 ГэВ. Для сравнения, серым цветом на шкале энергии отмечено максимально возможное значение энергии частиц РПЗ (1 ГэВ), желтым цветом отмечено максимально наблюдаемое значение энергии частиц СКЛ (100 ГэВ). Справа показан результат расчета поглощенной дозы радиации от частиц ГКЛ за защитным сферическим экраном из алюминия [39]

Рекомендованная защита от частиц ГКЛ при длительных космических полетах для космонавтов должна составлять величину не менее 40 г/см^2, при этой толщине защиты существенно изменится химический состав частиц ГКЛ за экраном, это произойдет из-за существенного поглощения веществом экрана потока самого опасного вида радиации – тяжелых ядер (см. рис.24). В качестве защиты от радиации может быть использована вода, продукты питание, горючее, кислород, одежда, техническое оборудование.

.На рис. 25 показан дифференциальный энергетический спектр ГКЛ в области высоких энергий по данным разных мировых установок. Для частиц высоких энергий Луна является отличной мишенью. При взаимодействии с поверхностью Луны рождаются ливни частиц и античастиц всех известных типов. В частности нейтроны и мюоны высоких энергий от этих ливней могут

наблюдаться на Земле [25]. Это кажется не вероятным, ведь, например, мюон (его иногда называют тяжелым электроном), его масса тяжелее электрона в 207 раз, живет всего 2.2 миллионные доли секунды, но двигаясь со скоростью близкой к скорости света, из-за релятивистских эффектов [25], он может пройти расстояние между Луной и Землей и легко преодолеть атмосферу Земли. Есть экспериментальные данные подтверждающие, что высокоэнергичные заряженные частицы (мюоны) могут преодолеть даже защиту толщиной 800 метров скального грунта.

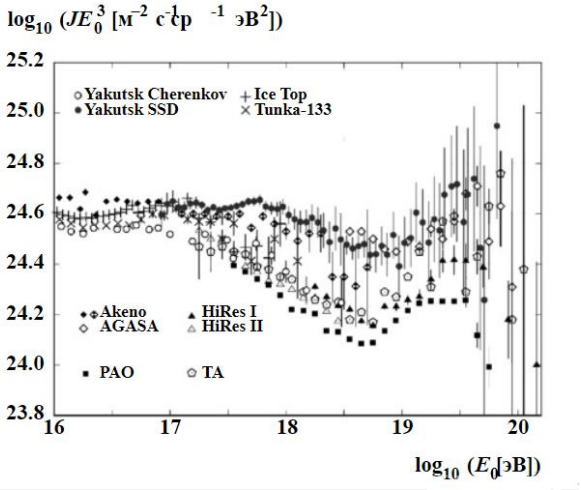


Рис. 25. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ в области высоких энергий по данным разных мировых установок [42].

Не зависимо от солнечной активности, при энергии частиц более 1000 МэВ основной вклад в полную поглощенную дозу радиации дают частицы ГКЛ.
На рис. 26 представлены дифференциальные энергетические спектры частиц ГКЛ и СКЛ, бомбардирующих поверхность Луны в годы минимума и максимума солнечной активности.

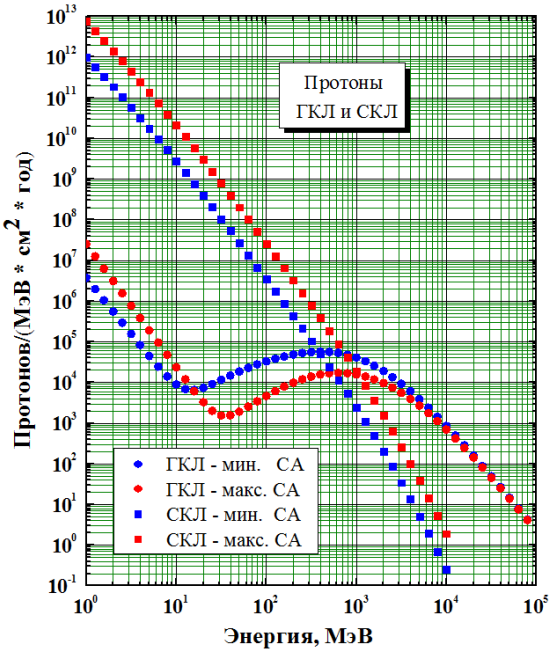


Рис. 26. Дифференциальные энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ в годы минимума и максимума солнечной активности[43].

Химический состав частиц ГКЛ более разнообразен по сравнению с потоками частиц СКЛ. Потоки частиц ГКЛ в своем составе имеют все известные химические элементы. На рис. 27 представлены дифференциальные энергетические спектры потоков ядер химических элементов ГКЛ (водорода, гелия, кислорода, кремния, железа) при минимуме солнечной активности.

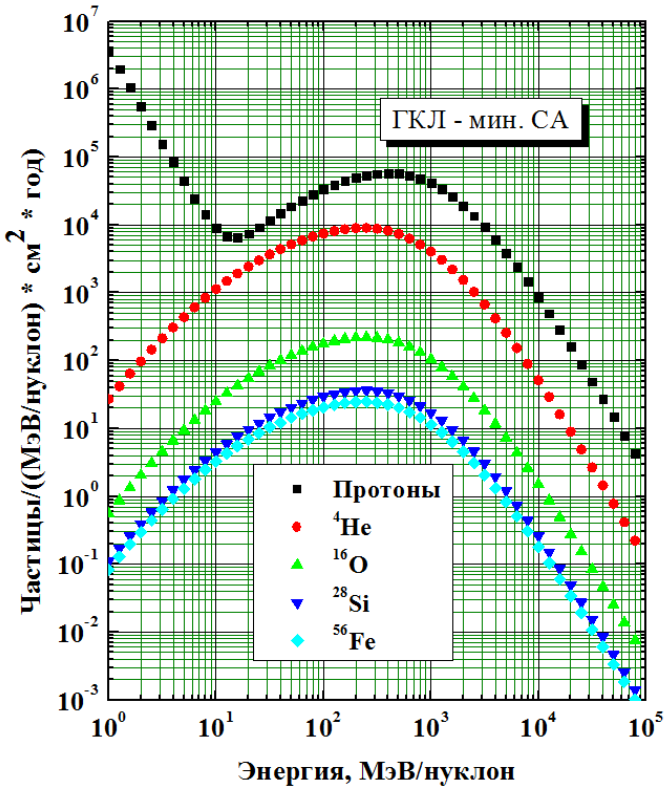


Рис. 27. Дифференциальные энергетические спектры потоков ядер химических элементов ГКЛ при минимуме солнечной активности [43].

Лунный грунт более, чем на 40% состоит из диоксида кремния (кремнезёма), **кроме этого** в грунте содержатся элементы: магния, алюминия, калия, кальция, титана, хрома, железа и кислорода в связанном состоянии. Имеются следы стронция, иттрия и циркония. В случае длительного пребывания человека на Луне, придется создавать радиационную защиту от ионизирующего излучения, используя лунный грунт. На рис. 28 показаны рассчитанные значения дифференциальных энергетических спектров вторичных протонов, генерируемых частицами ГКЛ при минимуме солнечной активности, над поверхностью Луны и на различных глубинах лунного грунта.
Потоки вторичных протонов (в диапазоне от 5 МэВ до 300 МэВ), генерируемых частицами ГКЛ на глубине 76 см лунного грунта, больше чем над лунной поверхностью. Хотя мощность дозы радиации от первичных и вторичных частиц
ГКЛ на глубине 76 см лунного грунта существенно меньше, чем над лунной поверхностью.

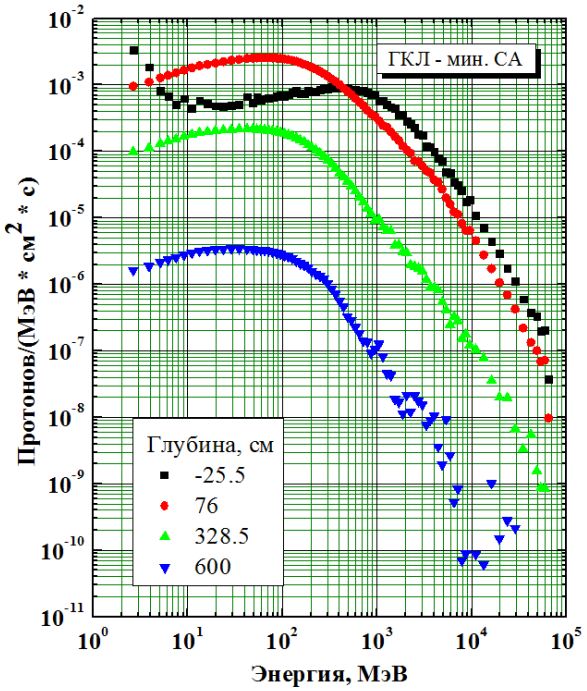


Рис. 28. Рассчитанные значения дифференциальных энергетических спектров потоков вторичных протонов, генерируемых частицами ГКЛ при минимуме солнечной активности, над поверхностью Луны и на различных глубинах лунного грунта [43].

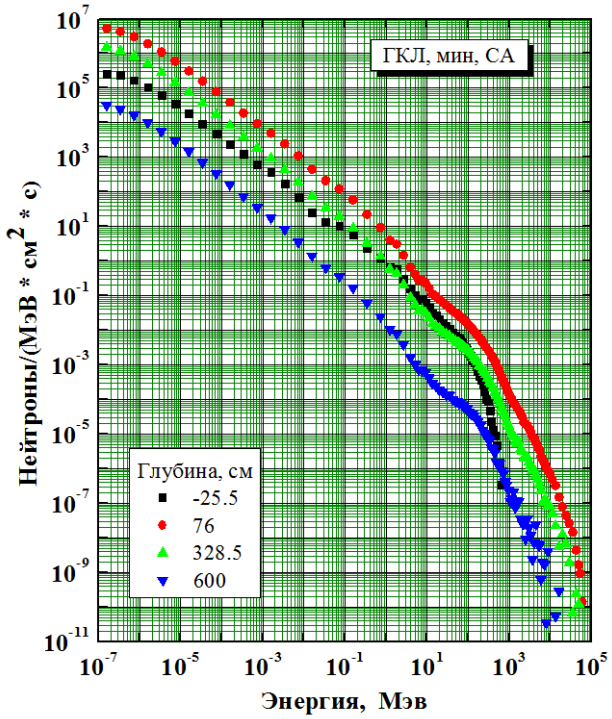


Рис. 29. Рассчитанные значения дифференциальных энергетических спектров потоков вторичных нейтронов, генерируемых частицами ГКЛ при минимуме солнечной активности, над поверхностью Луны и на различных глубинах лунного грунта [43].

При взаимодействии частиц ГКЛ с лунным грунтом идет эффективная генерация вторичных нейтронов. На рис. 29 показаны рассчитанные значения дифференциальных энергетических спектров вторичных нейтронов, генерируемых частицами ГКЛ при минимуме солнечной активности, над поверхностью Луны и на различных глубинах лунного грунта. Потоки вторичных нейтронов, генерируемых частицами ГКЛ на глубине 76 см лунного грунта, больше чем над лунной поверхностью.

ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ОРБИТЕ И НАПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

При расчете дозы радиации внутри сферы из алюминия, учитывается суммарная доза радиации от протонов и ядер химических элементов (до урана) ГКЛ и от протонов и ионов (до никеля) СКЛ. При оценке радиационных условий на поверхности Луны дополнительно учитывался вторичный поток частиц от поверхности (частицы альбедо). Доза радиации от частиц альбедо зависит от рельефа местности и от энергетического спектра частиц падающего на поверхность, но не превышает 10% от общей дозы радиации ГКЛ [45,46], доля дозы альбедо от дозы радиации частиц СКЛ всего единицы процентов, из-за мягкого энергетического спектра.
На рисунке 30 показан относительный вклад первичных частиц ГКЛ и частиц альбедо в общую мощность поглощенной дозы (расчет выполнен с помощью библиотеки функций GEANT4). Реально, доля поглощенной дозы радиации от частиц альбедо относительно поглощенной дозы радиации от общего потока частиц может существенно меняться от события к событию. Это зависит от энергетического спектра и состава первичных частиц.

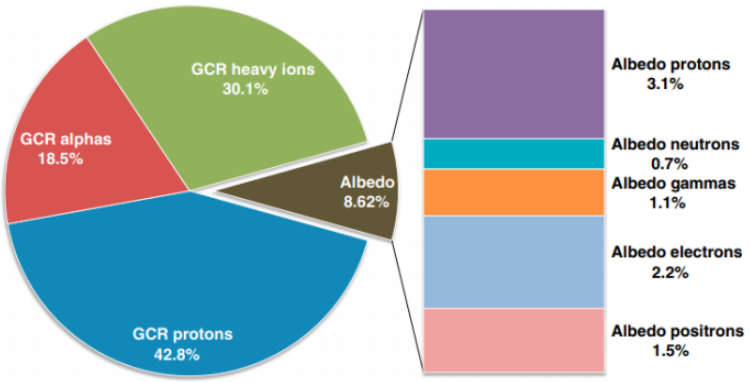


Рис. 30. Относительный процентный вклад в общую мощность дозы радиации от первичных частиц ГКЛ и различных типов частиц альбедо (расчет с помощью Geant4) [46].

Результаты расчета средней интенсивности дифференциальных потоков быстрых нейтронов у поверхности Луны от ГКЛ в 1970 и 1977 гг [46] позволяют сделать вывод, что поток быстрых нейтронов (~ 1 МэВ) альбедо от частиц ГКЛ у поверхности Луны в период минимума солнечной активности (1977) более, чем в 2 раза превышал поток нейтронов альбедо в максимуме активности Солнца (1970).

Расчетные значения эквивалентной дозы, создаваемой на поверхности Луны за экраном различной толщины в течение 1 года в периоды минимума и максимума солнечной активности, приведены в работах [43,44]. Расчеты выполнены для заряженных частиц ГКЛ и СКЛ, а также для вторичных нейтронов, образованных в защитном экране и в грунте Луны. Если космический аппарат находится непосредственно на поверхности Луны, то дозой радиации от частиц альбедо пренебрегают. В этом случаи считают, что облучение происходит только с

верхней полусферы и полная поглощенная доза определяется как половина от дозы радиации на орбите. Существенную неопределенность в величину поглощенной дозы радиации вносят потоки частиц СКЛ от солнечных вспышек. В настоящее время, уровень развития науки не позволяет прогнозировать с высокой степенью достоверности реальные интенсивности потоков частиц СКЛ, их спектры и состав. По этой причине не существует возможность определить, достаточно точно, какая конкретно доза радиации ожидается на орбите Луны или на ее поверхности в определенный период времени. Реальная доза радиации может меняться в широких пределах. На практике, мы можем рассчитать уровень поглощенной дозы, который ожидаемая доза не превысит с определенной вероятностью. Радиация в околоземном космическом пространстве изучается уже многие десятилетия. В результате этих исследований, на базе большого объема экспериментальных данных наблюдений за потоками ионизирующих излучений, была построена статистическая модель, которая позволяет рассчитать предельно высокий уровень поглощенной дозы радиации, который, с определенной вероятностью, в будущим реальная (наблюдаемая) доза радиации не превысит. Расчеты поглощенной дозы радиации с заданным доверительным уровнем (ДУ), обычно осуществляются для телесного угла 4π внутри сферы из алюминия с помощью стандартных программ COSRAD и SPENVIS. При расчете задается доверительный уровень, как степень достоверности того, что реальные значения дозы не будут превышать рассчитанные. На рисунке 31 показаны расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны для второй половины 2018 года (кривая 1) выполненные 99% доверительным уровнем и реальные значения дозы (кривая 2), полученные по прямым измерениям потоков ионизирующих излучений. Расчет, выполненный с доверительным уровнем 99% , означает, что из 100 космических миссий, в 99 космических миссиях уровень поглощенной дозы радиации не превысит расчетных значений. На рисунке 31 мы видим, что реальные данные дозы радиации на орбите действительно меньше расчетных значений на несколько порядков, например, за защитой из алюминия в 0.01 г/см^2 .

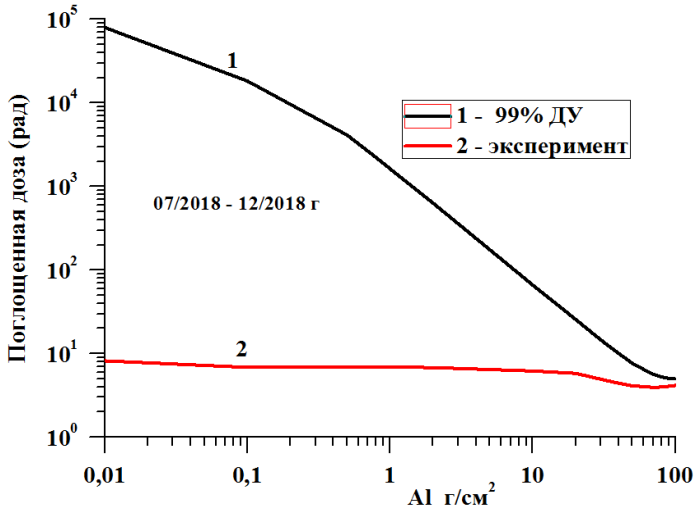


Рис.31. Результат расчета поглощенной дозы радиации на орбите Луны для второй половины 2018 г, выполненный с 99% доверительным уровнем и реальные значения дозы, наблюдаемые в этот период.

Большое различие между расчетными значениями дозы радиации и реальными значениями, вблизи минимума активности Солнца, связано с тем, что во второй половине 2018 года, должны были быть (по модели) вспышки хотя бы средней мощности, а их не было. Если и были солнечные вспышки, то все они были малой мощности с энергией протонов СКЛ менее 2 МэВ. Таких вспышек за 11 летний солнечный цикл бывает более 10 тысяч.

Пробеги заряженных частиц в веществе. Заметим, проникающая способность протонов с энергией 2 МэВ в алюминии не более 0.01 г/см^2 [25] . Частицы СКЛ от таких солнечных вспышек не дают вклад в дозу радиации за защитой более 0.01 г/см^2 .

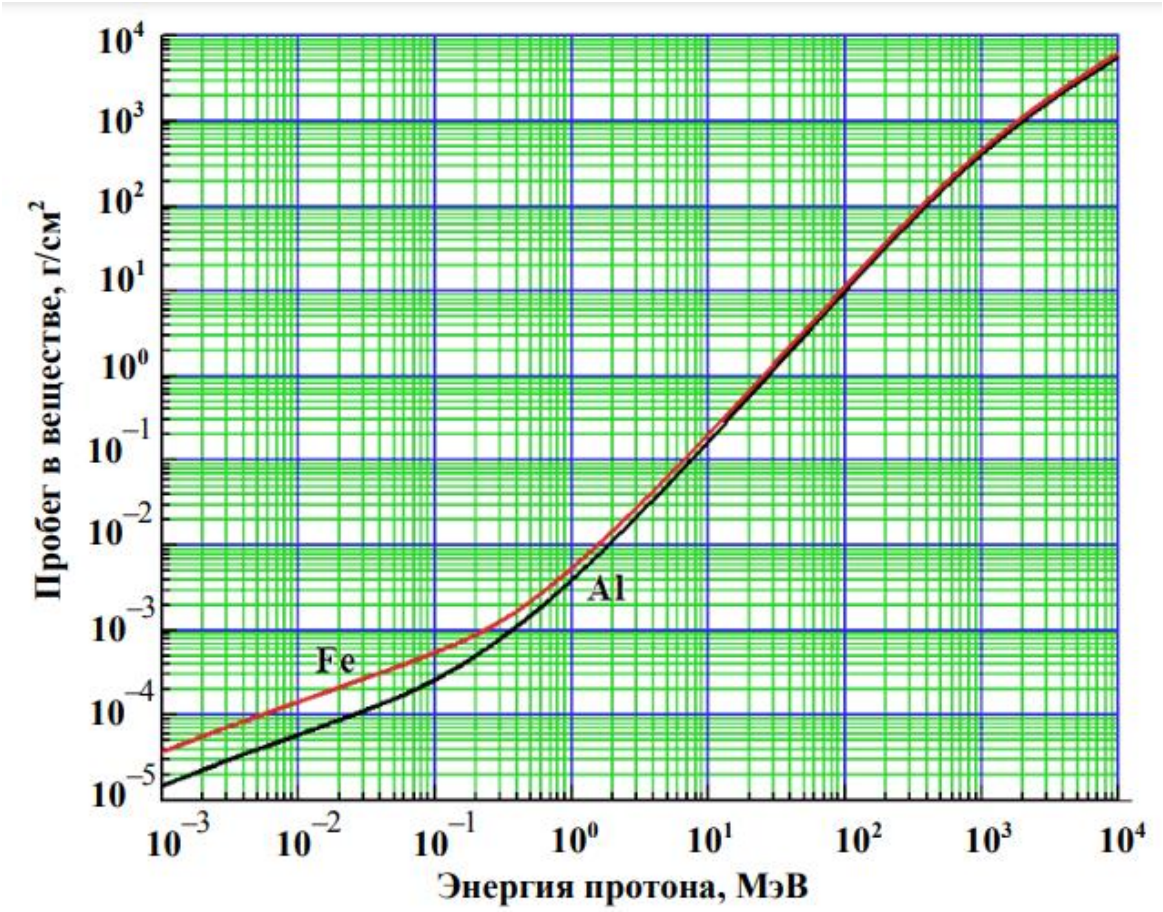


Рис. 32. Зависимость полного пробега протона в железе и алюминии от энергии .

Пробеги заряженных частиц в веществе. На рис. 32 показана зависимость полного пробега протона в железе и алюминии от энергии. При энергии протона меньше 10 МэВ пробег протона в алюминии существенно меньше, чем в железе.

На рис. 33 показана зависимость полного пробега электрона в железе и алюминии от энергии. При энергии электрона меньше 10 МэВ пробег электрона в алюминии меньше, чем в железе [25]. Поскольку в околоземном космическом пространстве основная масса электронов существенно меньше 10 МэВ, то алюминий будет обеспечивать лучшую радиационную защиту, чем железо. Даже в случае, когда имеются электроны с энергией более 10 МэВ, мы все равно рекомендуем, при возможности, не использовать в конструкциях КА тяжелые вещества. Это связано с тем, что в тяжелых веществах эффективно генерируется электронами глубоко проникающее жесткое электромагнитное излучение, защита от которого более сложная, чем от электронов.

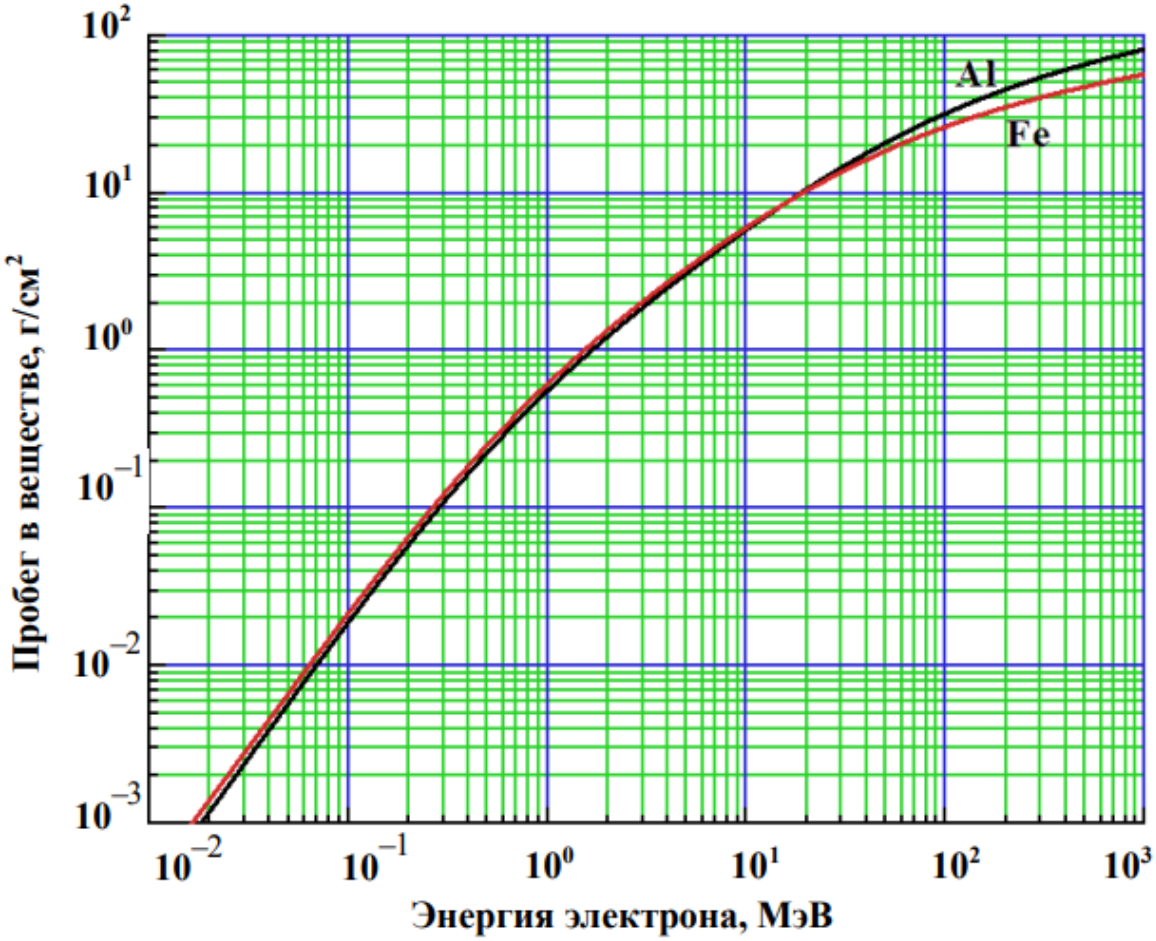


Рис. 33. Зависимость полного пробега электронов в железе и алюминии от энергии .

На рис. 34 приведены значения удельной поглощенной дозы в кремнии для альфа-частиц, протонов, электронов, нейтронов, фотонов в диапазоне энергии частиц от 0,1 до 1000 МэВ. Для оценки поглощенной дозы радиации достаточно знать дифференциальный энергетический спектр частиц и зависимость удельной поглощенной дозы частиц от энергии.

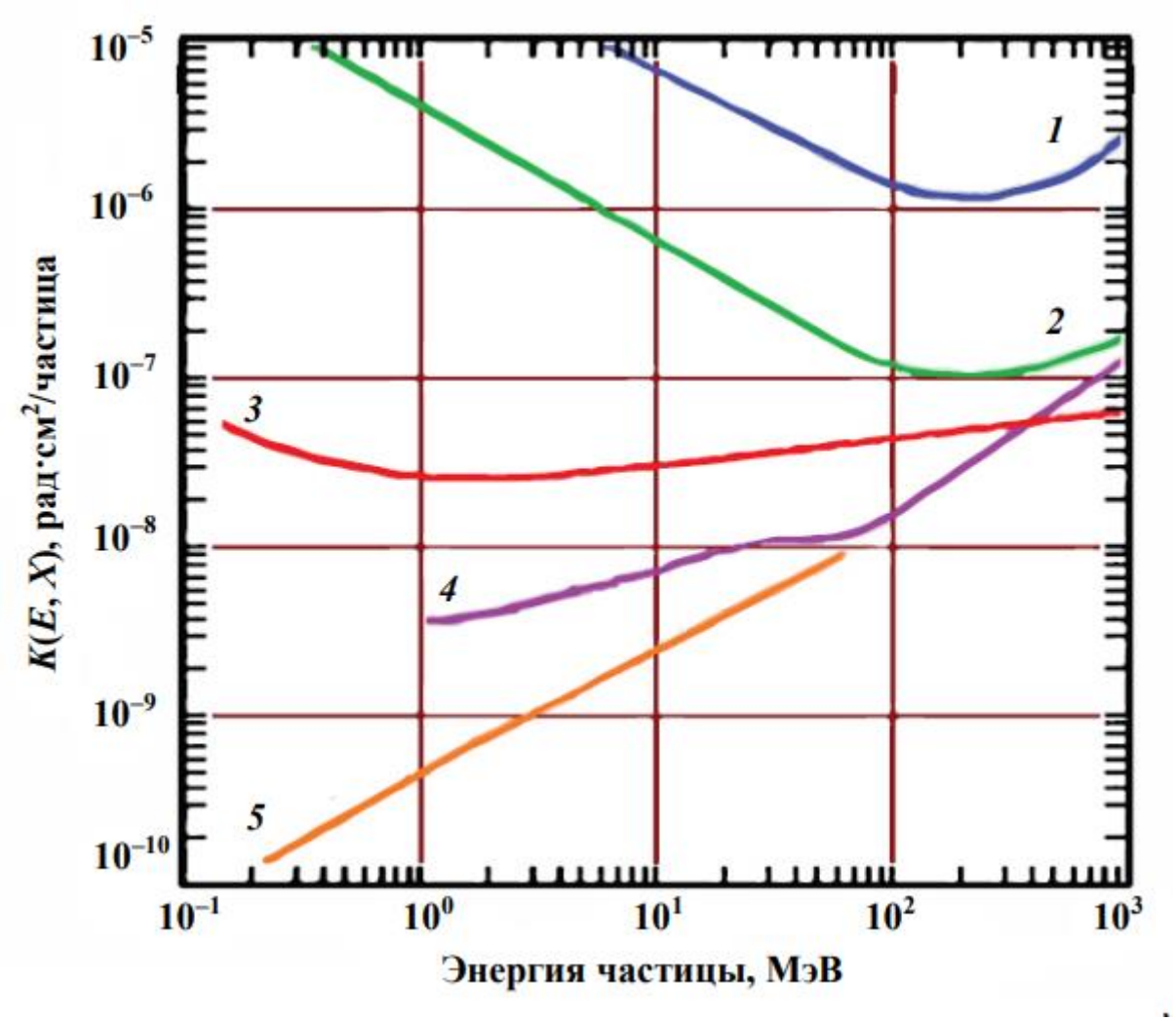


Рис. 34. Коэффициенты перехода от потока частиц к поглощенной дозе (удельная поглощенная доза) в кремнии: 1 – альфа-частицы; 2 – протоны; 3 – электроны; 4 – нейтроны; 5 – фотоны [25].

На рисунке 35 и 36 показаны расчетные значение поглощенной дозы радиации с доверительным уровнем 99% от частиц ГКЛ и СКЛ в различные годы 25-го цикла солнечной активности. Поглощенная доза радиации при доверительном уровне 99% , рассчитанная для

максимума солнечной активности, на орбите Луны, в несколько раз превосходит дозу радиации, рассчитанную для минимума активности Солнца.

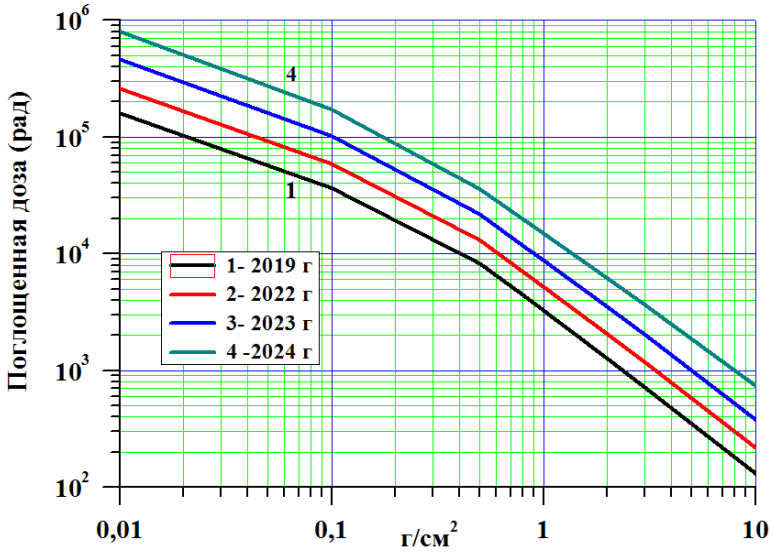


Рис.35. Расчетные значение поглощенной дозы радиации на орбите Луны в различные годы фазы роста солнечной активности в 25-м цикле.

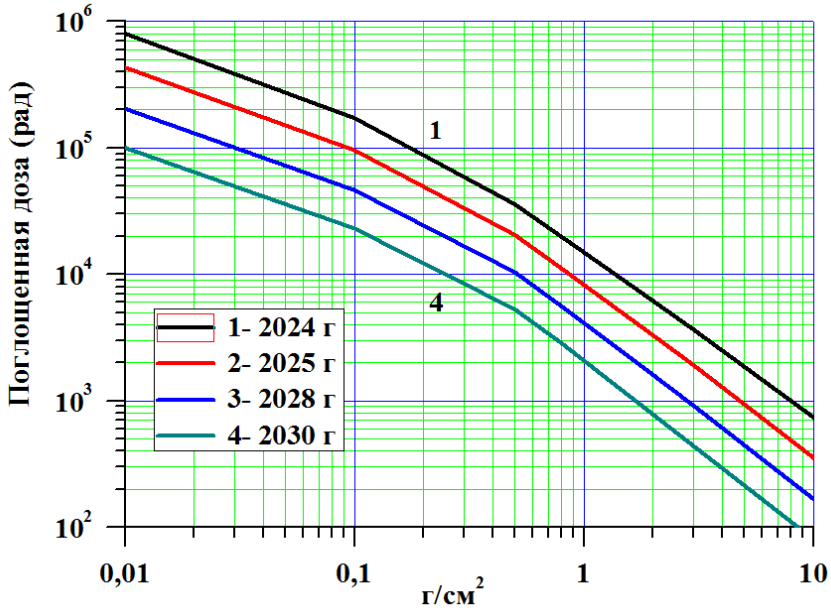


Рис.36. Расчетные значение поглощенной дозы радиации на орбите Луны в различные годы фазы спада солнечной активности в 25-м цикле.

В таблице 1 приведены значения поглощенной дозы радиации в центре сферы из алюминия, от частиц ГКЛ + СКЛ за 1 год на поверхности Луна, рассчитанные для начала 25-го цикла солнечной активности (2021 г) с 99% доверительным уровнем (ДУ). Расчеты выполнены с учетом альбедо частиц [8] и эффектом экранирования Луной. Считалось, что на поверхности Луны облучение частицами ГКЛ и СКЛ происходит только с верхней полусферы, по этой причине, доза радиации на поверхности составляет 0.5 от дозы на орбите Луны, дополнительно плюс доза от частиц альбедо порядка 0.1 (это максимум) от полной доза

радиации. Мы учли частицы альбедо с избытком, хотя при расчетах, обычно, вкладом частиц альбедо пренебрегают.

Таблица 1.

Доза (рад) от СКЛ + ГКЛ на поверхности Луны в 2021г, 99% ДУ				
Al (г/см^2)	протоны	нейтроны	ядра	сумма
1.00E-0002	7.938E+004	5.202E-001	3.311E+004	1.125E+005
1.00E-0001	2.101E+004	4.234E-001	4.595E+003	2.561E+004
5.00E-0001	5.290E+003	3.939E-001	4.408E+002	5.731E+003
8.00E-0001	2.860E+003	4.027E-001	2.117E+002	3.072E+003
1.00E+0000	2.125E+003	4.160E-001	1.490E+002	2.275E+003
2.00E+0000	8.348E+002	4.941E-001	5.091E+001	8.862E+002
3.00E+0000	4.812E+002	5.719E-001	2.760E+001	5.094E+002
1.00E+0001	8.807E+001	9.650E-001	5.400E+000	9.444E+001
2.00E+0001	3.225E+001	1.231E+000	2.322E+000	3.581E+001

В таблице 2 приведены значения поглощенной дозы радиации внутри сферы из алюминия от частиц ГКЛ + СКЛ за 3 год (с 2021 по 2023 гг.) на орбите Луны, рассчитанные для различных доверительных уровней (ДУ). Напоминаем роль доверительных уровней, которые мы задаем при расчете, например, если расчет, выполненные с доверительным уровнем 50%, то это означают, что из 100 трехгодичных космических миссий в 50 –ти космических миссиях, реальные дозы радиации будут меньше расчетных значений. Нельзя рассматривать расчеты, выполненные с доверительным уровнем 50% как получение средних значений дозы на орбите.

Таблица 2.

Доза (рад) от частиц ГКЛ + СКЛ на орбите Луны за 3 год, для разных ДУ						
Al (г/см2)	99%	95%	90%	75%	65%	50%
1.000E-002	6.732E+005	3.78E+0005	2.95E+0005	1.80E+0005	1.43E+0005	1.12E+0005
1.000E-001	1.460E+005	8.32E+0004	6.54E+0004	3.90E+0004	3.03E+0004	2.30E+0004
5.000E-001	3.023E+004	1.72E+0004	1.35E+0004	7.64E+0003	5.51E+0003	3.85E+0003
8.000E-001	1.643E+004	9.11E+0003	7.07E+0003	3.86E+0003	2.77E+0003	1.92E+0003
1.000E+000	1.233E+004	6.73E+0003	5.19E+0003	2.80E+0003	1.99E+0003	1.37E+0003
2.000E+000	4.992E+003	2.61E+0003	1.98E+0003	1.02E+0003	7.15E+0002	4.86E+0002
3.000E+000	2.921E+003	1.48E+0003	1.11E+0003	5.58E+0002	3.88E+0002	2.61E+0002
1.000E+001	5.722E+002	2.58E+0002	1.88E+0002	7.87E+0001	5.33E+0001	3.82E+0001
2.000E+001	2.185E+002	8.65E+0001	6.17E+0001	2.69E+0001	1.79E+0001	1.15E+0001

На орбите и вблизи поверхности Луны радиационная среда представляет собой сложную смесь ионизирующих частиц, в которых заряженные частицы с высокой проникающей способностью от Солнца и источников вне солнечной системы представляют реальную опасность для космических лунных мисси. Изучение и постоянный мониторинг солнечной активности может позволить надежно прогнозировать временные окна (продолжительностью в несколько месяцев) с низким уровнем радиации для лунных миссий,

Наличие пещер естественного происхождения в лунных скальных породах позволяет обеспечить полную защиту от всех видов радиации на Луне.(пещеры на Марсе могут играть туже роль, что и на Луне). Отсутствие радиационных поясов и слабое гравитационное поле создает идеальные условия для размещения в окололунном пространстве базу для временного пребывания, дозаправки и ремонта тяжелых космических аппаратов, предназначенных для полета к Марсу и другим планетам. Основной персонал для обслуживания КА на орбите Луны может безопасно располагаться подлунным грунтом порядка нескольких метров, радиационные условия в помещениях подлунным грунтом будут такие же, как на поверхности Земли. Кроме того, заметим, что отсутствие атмосферы на Луне создает идеальные условия для наблюдательной астрономии и для исследования вариаций и анизотропии космических лучей с помощью нейтронных мониторов, в частности для исследования нейтронной компоненты космических лучей от остатков ближайших сверхновых звезд [48].

Литература

1. Вернов С.Н., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е., Шафер Ю.Г. Исследование вариаций космического излучения. УФН, 1957, т.63, вып.3 с.149-162. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ufn.ru/ru/articles/1957/9/j/ свободный.
2. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерение космического излучения на искусственном спутнике Земли. Доклады АН СССР, 1958, т.120, N 6, с.1231-1233. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/radiationbeltsrus.aspx свободный. Прямая ссылка: http://d54x.ru/books11/dan23194.pdf
3. Вернов С.Н., Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Изучение мягкой компоненты космических лучей за пределами атмосферы. Искусственные спутники Земли, 1958, т.1, вып. 2, с.61-69.
4. Вернов С.Н., Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Изучение мягкой компоненты космических лучей за пределами атмосферы. Planet.Space Sci., 1959, т.1, N 2, с.86.
5. Вернов С. Н., Чудаков А. Е. Исследования космических лучей и земного корпускулярного излучения при полетах ракет и спутников / С. Н .Вернов, А. Е. Чудаков // УФН. – М. : Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 1960. – Т. 70. – Вып. 4. – С. 585 – 619. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ufn.ru/ru/articles/1960/4/b/ свободный.
6. О радиационной опасности при космических полетах / Дж. А. Ван Аллен // УФН. – М. : Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 1960. – Т. 70. – Вып. 4. – С. 715 – 724. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ufn.ru/ru/articles/1960/4/f/ свободный
7. Кузнецов С. Н., Тверская Л. В. Радиационные пояса Земли / С. Н. Кузнецов, Л. В. Тверская; под ред. профессора М. И. Панасюка // Модель космоса. – М. : КДУ, 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://cosmic-rays.ru/books1_11.aspx свободный.
8. О формировании зазора в электронной компоненте радиационных поясов / П. А. Беспалов, Х.-У. Вагнер, А. Графе [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1983. – Т.23. – Вып.1. – С. 68 – 74.
9. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. "Альфвеновские мазоры" 1986 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/books11/19861101.pdf свободный.

10. Трахтенгерц В.Ю., Демихова А.Г. "Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе" 1978 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/books1_11.aspx свободный.
11. Тверской Б. А. Основы теоретической космофизики. Избранные труды / Б. А. Тверской // Сост. М. Ф. Бахарева, А. В. Гетлинг, Э. Н. Сосновец [и др.]. – М. : Едиториал УРСС. 2004. – 366 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/radiationbeltsrus.aspx свободный. Прямая ссылка: http://d54x.ru/books11/BaseTheoretica.pdf
12. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера : пер. с англ. / В. Хесс. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с. : ил. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/books1_11.aspx свободный. Прямая ссылка: http://d54x.ru/books11/19721101.pdf
13. Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем : пер. с англ. / Х. Редерер. – М. : Мир, 1972. – 193 с. : ил. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/books1_11.aspx свободный
14. Безродных И.П., Шафер Ю.Г. / О связи долгопериодических вариаций электронов во внешнем радиационном поясе Земли с параметрами солнечного ветра// Космические исследования. 1982. т.20 вып.4, с. 639-641.
15. Безродных И.П. / О связи всплесков электронов во внешнем радиационном поясе Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра // «Нестационарные потоки заряженных частиц в околоземном космическом пространстве». Сб.науч.трудов. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1983. с.73-77.
16. Безродных И.П., Шафер Ю.Г. / Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью // Изв.АН. СССР. Сер.физ. 1983. т.47, № 9. С.1684-1686. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/articles/02/198301.pdf свободный
17. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г., Морозова Е.И.,Писаренко Н.Ф. / Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации. // Изв.АН СССР. Сер.физ. 1984. т.48, N 11. с.2165-2167
18. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Морозова Е.И., Писаренко Н.Ф., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г. / Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. т.24. N 5. с.818-820. . [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/articles/02/198401.pdf свободный
19. Безродных И.П., Морозова Е.И., Шафер Ю.Г. / Вариации интенсивности потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника // Космические исследования. 1986., т.24, вып. 5. с.762-769.
20. Безродных И.П., Морозова Е.И., Шафер Ю.Г. / Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли. // Космические исследования. 1987 г. т.25. № 1. с.64-73.
21. Bezrodnykh I.P., Berezhko E.G., Shafer Yu.G., Shtygashev I.E., Morozova E.I., Pissarenko N.F.,Mineev Yu.V., Spirkova E.S., Shavrin P.I. Influence of Large-Scale Disturbances of Solar Wind on Dynamics of Energetic Electrons in the Outer Magnetospere. // Proc.20th ICRC. Moscow. 1987. v.4. p. 453-456.
22. Безродных И.П. /Исследование внешнего радиационного пояса Земли // В кн. Космофизические исследования в Якутии. Часть 2. Якутск. ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. С.156-162. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/articles/02/200003.pdf свободный
23. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Будяк М.Н., Кожухов М.В., Мусалитин А.А., Семенов В.Т./ Структура энергетических спектров потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и динамика поглощенной дозы

радиации в период минимума солнечной активности в 2007 г и 2009 г. // "Вопросы электромеханики, труды ВНИИЭМ". Приложение за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции. "Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли". - М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». - 2017. с.300-309, [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/articles/02/201702.pdf свободный.

24. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Казанцев С.Г., Будяк М.Н., Кожухов М.В., Семенов В.Т. Эффекты воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты малых космических аппаратов// Материалы круглого стола "Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения". 12 апреля 2016 г. АО "НИИЭМ", г. Истра, 2016, С. 156-170. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/articles/02/201603.pdf свободный.
25. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семенов В.Т. / Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2014. – 106 с. [Электронный ресурс] – книга Режим доступа: : http://d54x.ru/radiationbeltsrus.aspx свободный. Прямая ссылка: http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf
26. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Будяк М.Н., Кожухов М.В., Семенов В.Т. / Модуляция интенсивности потоков частиц галактических космических лучей и частиц внешнего радиационного пояса рекуррентными высокоскоростными потоками плазмы солнечного ветра// "Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ", М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». - 2017. Том. 157, № 2, с. 32-40. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/157/32-40.pdf свободный.
27. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Кожухов М.В., Павлов Ю. С./Динамика Кр- индекса геомагнитной активности для семи солнечных циклов (период 1932—2014 годов). сезонные вариации.//"Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ", М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». - 2018. Том. 167, № 6, с. 48 – 56. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/167/48-56.pdf свободный.
28. Модель космоса. Т. I / под редакцией профессора М. И. Панасюка // Физические условия в космическом пространстве. – М. : КДУ. – 2007. – 872 с. : ил. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://cosmic-rays.ru/books1_11.aspx свободный.
29. Модель космоса. Т. II. / под редакцией профессора Л. С. Новикова // Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М. : КДУ. – 2007. – 1144 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://cosmic-rays.ru/books1_11.aspx свободный.
30. Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere / Danny Summers Ian R. Mann, Daniel N. Baker, Michael Schulz Editors. 2012. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/radiationbeltsrus.aspx свободный. Прямая ссылка: http://cosmic-rays.ru/books12/20121201.pdf
31. Список научных работ по исследованию РПЗ после 2012 г на основе анализа экспериментальных данных RBSP. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://d54x.ru/radiationbeltsang.aspx свободный.
32. Ускорение заряженных частиц в процессах типа солнечных вспышек / С. И. Сыроватский // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1975. Т. 39. – № 2. С. 359 – 374.
33. Электрические и магнитные поля, возникающие при разрыве нейтрального токового слоя / Б. В. Сомов и С. И. Сыроватский. // Изв. АН СССР, Сер.физ. – 1975. – Т. 39. – № 2. – С. 375 – 378.
34. Аннигиляция поля и ускорение частиц в солнечных вспышках / С. Б. Пикельнер, В. Н. Цытович // Астрон. журн. – 1975. – Т. 52. – С. 738 – 751.

35. Солнечные вспышки / В. Г. Курт; под ред. проф. М. И. Панасюка // Модель космоса. – М. : КДУ, 2007. – Т. 1. – С. 272 – 293. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://cosmic-rays.ru/books1_11.aspx свободный
36. Tripathi R.K., Wilson J.W., Badavi F.F. , De Angelis G./ A characterization of the moon radiation environment for radiation analysis.//Advances in Space Reseach 37(2006) p. 1749 – 1758. - [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/ tripathi2006Luna.pdf.
37. Gregory A. Nelson / Space Radiation and Human Exposues, A Primer // Radiation Research 185(4) : p. 349-358. DOI: http://dx.doi.org/10.1667/RR14311.1 - [Электронный ресурс] –- Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/nelson2016Luna.pdf
38. Heiken,G.,Vaniman,D.& French,B.M.(eds) The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon (Cambridge University Press, Cambridge,UK,1991).// 1991. -655 p., книга (формат pdf, 61,70 MB). [Электронный ресурс]. – Книга (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf
39. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. и др./ Защита космических аппаратов от ионизирующих излучений. // НИИЭМ - Конференция «Иосифьяновские чтения 2015» с 41-50. [Электронный ресурс]. – Материалы конференции (формат pdf). - Режим доступа: http://niiem.ru/222-conf03 свободный.
40. Quinn PR, Schwadron NA, Townsend LW, Wimmer-Schweingruber RF, Case AW, et al. / Modeling the effectiveness of shielding in the earth-moon-mars radiation environment using PREDICCS: five solar events in 2012.// J. Space Weather Space Clim., 7, A16, 2017, [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://doi.org/10.1051/swsc/2017014 свободный .
41. Бережко Е.Г., Елшин В.К., Крымский Г.Ф., Петухов С.И. "Генерация космических лучей ударными волнами" 1988 г. [Электронный ресурс] –- Режим доступа: http://d54x.ru/books1_31.aspx свободный .
42. Глушков А. В., Правдин М. И., Сабуров А. В./ Энергетический спектр космических лучей сверхвысоких энергий по данным наземных сцинтилляционных детекторов якутской установки шал // ЖЭТФ, 2019, том 155, вып. 3, стр. 481–489.
43. Денисов А. Н., Кузнецов Н. В., Ныммик Р. А., Панасюк М. И., Соболевский Н. М./ К проблеме радиационной обстановки на Луне, Космические исследования, 2010, том 48, № 6, с. 524–531. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/denisov2010.pdf
44. Кузнецов Н. В., Ныммик Р. А., Панасюк М. И., Денисов А. Н., Соболевский Н. М./ Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне // Космические исследования, 2012, том 50, № 3, с. 224–228. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/S2012_Luna.pdf
45. Moskalenko Igor V., Porter Troy A. / The gamma-ray albedo of the moon.// The Astrophysical Journal., 670: 1467-1472, 2007 December 1- [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/moskalenko2007.pdf
46. Harlan E. Spence, Michael J. Golightly, Colin J. Joyce, Mark D. Looper, Nathan A. Schwadron, Sonya S. Smith, Lawrence W. Townsend, Jody Wilson, and Cary 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/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/SW2013_Luna.pdf
47. Adams J. H., Bhattacharya M., Lin Z.W. (ets) / The ionizing radiation environment on the moon// Advances in Space Research 40 (2007) 338-341. (a COSPAR publication) . [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx свободный. Прямая ссылка: http://www.d54x.ru/articles/Luna/adams2007.pdf
48. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. / Ближайшие остатки сверхновых - вероятные источники нейтронов высоких энергий // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». -2012. -том. 130. -№5. -с. 39-42. [Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: http://jurnal.vniiem.ru/text/130/39.pdf , свободный.