

О РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ **Дж. А. Ван Аллен*

1. В в е д е н и е. Поскольку этот материал готовится к печати после конференции в Сан-Антонио, а большинство результатов наблюдений, представленных там, будет опубликовано в различных источниках, я решил написать более специальную статью, чем прочитанный мной там доклад на ту же тему, с оценкой радиационной опасности при космических полетах. Основные физические данные могут быть найдены в цитированной литературе.

2. К о с м и ч е с к и е л у ч и. Опасность со стороны космических лучей для путешественников в мировом пространстве (речь идет о людях и животных) неоднократно рассматривалась раньше и привлекала к себе достаточное внимание. Я не пытаюсь излагать эти вопросы здесь, а отсылаю читателя к наиболее полным работам^{1, 2} и к той литературе, которая в этих работах приводится.

За последние несколько лет было обнаружено, что иногда возникают случайные вспышки космического излучения, очевидно, имеющие своим источником Солнце. Это излучение, по-видимому, имеет ту же природу, что и обычное космическое излучение, но обладает более крутым спектром по импульсам частиц. Поэтому эффекты, связанные с этим излучением, проявляются более отчетливо на высоких геомагнитных широтах. Наиболее яркий случай из всех наблюдаемых до сих пор произошел 23 февраля 1956 г. Значительное число материалов наблюдений этого случая представлено в литературе^{3, 4, 5, 6}. Однако нет сведений о том, присутствовали ли в этой солнечной вспышке тяжелые ядра ($Z \geq 2$). В период Международного геофизического года наблюдалось некоторое количество других солнечных вспышек космического излучения аналогичной природы, но меньшей интенсивности; эти вспышки были обнаружены с помощью шаров, поднятых на значительную высоту, и приборов, установленных на спутниках^{7, 8, 9, 10, 11}.

3. М я г к о е и з л у ч е н и е в с и я н и я х. В 1953 г. было обнаружено, что в северной зоне сияний на больших высотах имеется заметный поток энергичных заряженных частиц. В последующих работах (1954, 1955, 1957 гг.) было обнаружено, что вторжение таких частиц как в северной, так и в южной зоне сияний является весьма распространенным процессом. Излучение связано со всем комплексом процессов сияний. Первичное излучение, как правило, состоит из электронов с энергиями приблизительно ниже, чем 100 кэв. Потоки, содержащие 10^8 электрон/см²сек с энергиями от 10 до 100 кэв, отнюдь не являются редкостью¹². Тормозное

*) Перевод с препринта. Department of Physics, State University of Iowa, май 1959 г.; публикуется с согласия автора. Перевод В. А. Угарова.

излучение, вызываемое замедлением этих электронов в атмосфере, проникает в атмосферу только до высот около 50 км и лишь в редких случаях до высоты 25 км^{14,15,16}. Наиболее отчетливая картина природы первичных частиц в сияниях была получена с помощью малых ракет, запускаемых в область самих сияний и около них из форта Черчилль, Манитоба в порядке осуществления части программы МГГ, предназначенной для США. Энергетический спектр электронов быстро возрастает по мере перехода от энергий 100 кэв к низшим энергиям. Протоны, энергетический спектр которых быстро растет, тоже присутствуют, но интенсивность их потока меньше на несколько порядков. Состав излучения и его интенсивность очень сильно зависят от времени и места наблюдения.

Большая часть излучения, включая сюда и вторичное тормозное излучение, поглощается в нескольких миллиметрах свинца. Тем не менее должны быть предприняты разумные предосторожности при подготовке высотных полетов через зону сияний с участием человека в условиях легкой защиты.

В настоящее время существует убеждение в том, что различные типы излучения, рассмотренные в этом разделе, являются проявлением влияния больших зон корпускулярного излучения, захваченного внешними областями земного магнитного поля.

4. Корпускулярное излучение, захваченное магнитным полем Земли*). Одно из наиболее интересных геофизических открытий за последние годы было сделано с помощью первых искусственных спутников Земли, запущенных в США: «Эксплорер I» (спутник 1958 г., альфа) и «Эксплорер III» (спутник 1958 г., гамма). Было обнаружено, что громадные области вокруг Земли заполнены потоками заряженных частиц (протонов и электронов) очень высокой интенсивности, временно захваченными магнитным полем Земли. Детальное изучение этого излучения явилось главным устремлением в течение прошлого года для группы сотрудников Государственного университета в Айове, а также участников Международного геофизического года в Советском Союзе. Хотя изучение этого излучения далеко не завершено, все же достигнуты значительные успехи в его наблюдении и интерпретации.

Читатель отсылается к работам^{21,22,28} за детальными сведениями относительно этого излучения, опубликованными в открытой печати.

Понимание динамики захвата заряженных частиц в магнитном поле Земли было значительно углублено с помощью экспериментов «Аргус» в августе—сентябре 1958 г. Эти эксперименты заключались в искусственной инъекции электронов β -распада (возникающих от осколков ядерного деления, полученных в результате взрыва на большой высоте некоторого атомного устройства с небольшим выходом радиоактивных продуктов) и последующем наблюдении с помощью «Эксплорера IV» (спутник 1958 г., эпсилон), ракет и другой техники геофизических исследований³¹.

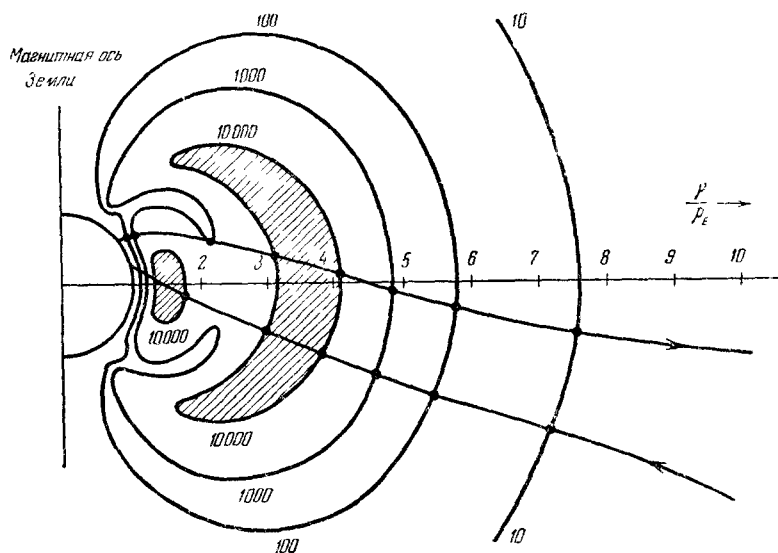
На рис. (стр. 717) дается общая картина структуры двух главных зон (или поясов) радиации, окружающих Землю, так, как эти зоны представляются на основании результатов, полученных с помощью счетчиков Гейгера, установленных на «Эксплорере IV» и «Пионере III». Эти результаты были в общем подтверждены и советскими исследователями с помощью измерительных приборов, установленных на «Спутнике III» и «Мечте».

Колоссальная и чрезвычайно детальная информация была получена по разнообразным вопросам с помощью «Эксплорера IV», на котором были установлены разнообразные детекторы. Эти материалы в настоящее время интенсивно обрабатываются.

*) См. первую статью в этом выпуске журнала, где изложены работы советских ученых по этому вопросу. (Прим. пер.)

5. Природа захваченного излучения. В настоящее время надежно установлено, что наблюдаемое излучение образовано заряженными частицами, захваченными магнитным полем Земли тем самым способом, который был исследован в классических теоретических работах Пуанкаре, Штермера и Альфвена. Что касается природы этих частиц и деталей их энергетического спектра, то здесь сделать окончательные выводы довольно трудно.

Исходя из того, что электроны всюду встречаются в природе, разумно допустить, что они входят и в это излучение. Среди других возможных



Структура интенсивности захваченного излучения вокруг Земли.

Диаграмма представляет собой сечение трехмерной фигуры вращения относительно магнитной оси плоскостью, проходящей через магнитную ось Земли. Контуры, соответствующие постоянной интенсивности, отмечены числами 10, 100, 1000 и 10 000. Эти числа представляют собой подлинные скорости счета генераторных счетчиков (Anton-Ture-302), установленных на «Эксплорере IV» и «Пионере III». Линейные масштабы диаграммы отнесены к радиусу Земли—6371 км. Восходящая и нисходящая ветви траектории «Пионера III» изображены наклонными волнистыми линиями. Подробности могут быть найдены в ²¹ и особенно в ²².

ядер следует отдать предпочтение протонам в силу того, что водород является основной составной частью материи.

Таким образом, простейшей рабочей гипотезой является предположение о том, что захваченное излучение состоит из протонов и электронов. Если принять это предположение, то задача сведется к измерению абсолютного дифференциального энергетического спектра каждой из двух компонент и его зависимости от точки пространства и направления, а также от времени.

Непосредственно очевидно из обширных наблюдений, проведенных на «Эксплорере IV», что простого, общего ответа на поставленный вопрос нет. Состав излучения и его интенсивность сильно зависят от положения в пространстве, от направления и времени. Для достаточно удовлетворительного рассмотрения проблемы в целом потребуется дождаться поступления более подробных экспериментальных наблюдений.

Тем временем имеющиеся результаты наблюдений (выполненные с помощью сравнительно устаревшего оборудования, с использованием

лабораторных эталонов) могут служить неплохим средством, чтобы разобратся в природе захваченного излучения. По мнению автора, современное состояние наших знаний таково, что хотя исчерпывающее определение природы этого излучения представляется весьма интересным и ценным, но, по всей видимости, оно не будет заметно отличаться от той картины, которую можно дать сегодня. Положение дел, как оно представляется сегодня, мы излагаем ниже:

а) Наблюдения с помощью различных детекторов, установленных на «Эксплорере IV», «Спутнике III», «Пионере IV» и «Мечте», определенно обнаружили, что природа излучения (а именно его состав и энергетический спектр его компонент) во внутренней зоне совершенно отлична от природы излучения во внешней зоне, причем это различие настолько сильно, что природа излучения даже в различных областях внутри какой-либо из этих двух зон может рассматриваться совершенно независимо.

б) Интегральный спектр излучения во внутренней зоне быстро спадает (хотя и не чересчур круто) от 1 мг/см^2 примерно до 140 мг/см^2 , а далее продолжается постепенное спадание в направлении увеличения защиты. Из того излучения, которое проходит 140 мг/см^2 , лишь часть, равная одному проценту, проникает через толщину в несколько граммов на квадратный сантиметр. На основании не очень точных измерений пробега и удельной ионизации, выполненных на «Эксплорере IV», последняя, наиболее проникающая компонента излучения идентифицируется (пробным образом) как состоящая из протонов, обладающих энергией порядка 100 Мэв . Менее проникающее излучение очень похоже на электроны с энергиями до 1 Мэв , обладающими энергетическим спектром, быстро возрастающим (хотя возрастающим и не столь быстро, как это имеет место в мягком излучении в сияниях) в сторону малых энергий. Потоки энергии до значений $100 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стерад}$ были обнаружены под поглотителем толщиной 1 мг/см^2 .

в) Внешняя зона имеет совершенно иную природу. Все данные сходятся на ее исключительно электронном составе, поскольку характеристики детекторов, использованных до сих пор, позволяют делать соответствующие наблюдения: наименьшее значение примененного поглотителя составляет 1 мг/см^2 . Энергетический спектр, по-видимому, напоминает энергетический спектр мягкого излучения сияний—с резким подъемом при переходе к низким энергиям от верхнего предела, практически равного примерно 100 кэв . Поток электронов со всех направлений с энергией, превышающей 20 кэв , в центре внешней зоны по порядку величины равен $10^{11} \text{ част/см}^2 \cdot \text{сек}$.

г) Внутренняя зона оказалась относительно устойчива по данным наблюдений за ее поведением за период, когда осуществлялись наблюдения, хотя отмечены и случайные флуктуации.

д) Имеются хорошо заметные преходящие флуктуации в «щели» между двумя зонами, а также флуктуации очень большой величины как по интенсивности, так и по пространственной структуре во внешней зоне. Эти флуктуации, по всей видимости, связаны с солнечной активностью.

6. Д о з а о б л у ч е н и я. На приборах, заключенных в защитную оболочку обычного вида, требуемую как минимум для космических кораблей ($\sim 1 \text{ г/см}^2$, причем материал с низким значением Z), в центре внутренней зоны доза облучения составляла примерно 10 рентген в час; в центре внешней зоны доза облучения превосходила указанную цифру в несколько раз.

Доза облучения во внутренней зоне лишь немного уменьшается защитой 4 г/см^2 свинца; однако во внешней зоне с помощью той же защиты она уменьшается по крайней мере в пятьдесят раз («Пионер IV»).

Безусловно, доза облучения внешней поверхности космического корабля во много раз больше, особенно во внешней зоне.

7. Происхождение захваченного излучения. Исходя из обширных сведений, касающихся взаимоотношений Земля—Солнце^{32,33}, и из предшествующего открытия мягкого излучения сияний¹², мы сначала предположили¹⁹, что захваченное корпускулярное излучение состоит из ионизованного солнечного газа, который был инжектирован в магнитное поле Земли, причем ускорение этого газа до наблюдаемых энергий могло быть локальным явлением в земном магнитном поле.

Впоследствии различные авторы высказали предположение, что захваченное излучение может образовываться, по крайней мере частично, за счет других процессов. Неер³⁴ предположил, что проникающая компонента может возникнуть из замедленных μ -мезонов, испытавших радиоактивный распад; эти μ -мезоны появляются в земной атмосфере как часть «альбеда» космических лучей. Христофилос³⁵, Вернов²⁷, Келлог²⁹ и Зингер^{25,26} обратили внимание на нейтронную компоненту альбеда космических лучей как на один из возможных источников, а автор, упомянутый последним, подчеркнул потенциальную возможность нейтронов высокой энергии к образованию проникающей компоненты во внутренней зоне. Эти предположения опираются на способность нейтронов, образованных распадами ядер в атмосфере, вызванными космическими лучами, двигаться по направлению от Земли через земное магнитное поле без отклонения вплоть до их радиоактивного распада. Продуктами распада нейтрона (время распада в системе покоя 11,7 мин.) являются электрон, протон и нейтрино. Кинетическая энергия протона сравнима с кинетической энергией порождающего его нейтрона, электроны имеют хорошо известный спектр β -распада (нижний предел составляет 782 кэв для покоящегося нейтрона); что касается нейтрино, то оно не дает вклада в наблюдаемые геофизические явления.

Наблюдаемый спектр и состав излучения во внутренней зоне, по-видимому, согласуются с гипотезой происхождения на основе нейтронного распада: преобладающая компонента составлена из электронов, имеющих спектр, очень похожий на спектр электронов нейтронного распада, а меньшая компонента (не проникающая) состоит из протонов с энергией порядка 100 Мэв. Дальнейшие подробности можно найти в ²¹. Нужно исследовать многочисленные количественные связи, прежде чем можно будет сказать, что нейтронно-распадное происхождение внутренней зоны является надежно установленным, однако современное состояние наших знаний сложилось в пользу этой гипотезы.

Очень мало сомнений в том, что обширная внешняя зона и большое разнообразие связанных с ней геофизических явлений могут быть приписаны солнечному газу, инжектированному на траектории захвата в магнитное поле Земли. Место и механизм ускорения частиц до наблюдаемых энергий являются основной неразрешенной проблемой.

8. Практические соображения о космических полетах. а) Примерно в пределах широт от 40°N и 40° S на любой долготе захваченное излучение пренебрежимо мало на всех высотах ниже 600 км. Следовательно, радиационная опасность при продолжительных полетах людей и животных в пределах этой области примерно такая же, какая создается обычным космическим излучением (см. п. 2 настоящей статьи). Интересно отметить, что относительное отсутствие захваченного излучения ниже 600 км обусловлено относительно высокой плотностью атмосферы на этих высотах (если сравнивать, например, с плотностью на высоте 2000 км). Однако возрастающая плотность атмосферы на малых высотах, конечно, ограничивает время существования спутников из-за

сильного торможения в воздухе. Однако если высота перигея превосходит 250 км, время существования спутника может доходить до нескольких лет. Сочетание двух упомянутых критериев приводит к выводу о том, что будущие космические станции, которые будут иметь на своем борту людей и будут действовать в течение периодов времени, составляющих годы, должны иметь высоту перигея, превышающую 250 км, и высоту апогея, не превышающую 600 км. Представляется благоразумным использовать орбиты с наклоном относительно земной экваториальной плоскости, не превышающим 40° . Орбиты большего наклона значительно увеличивают рассеяние (или осаждение) захваченного излучения на космическом корабле, особенно на малых высотах в зоне сияний. Обычное излучение сияний очень легко может быть экранировано (1 мм свинца), однако в этой области наблюдаются спорадические вспышки более проникающего излучения значительной интенсивности. В целом биологический риск, быть может, и не слишком велик; но имеющиеся данные говорят о том, что на этот риск все же не следует идти, если нет особых вынуждающих причин для использования орбит с высоким наклоном. Тем временем весьма важно расширить наблюдения за излучением в зонах высоких широт с помощью спутников, запускаемых на большие и малые высоты.

б) Приблизительно круговая орбита спутника с периодом обращения 24 часа имеет радиус около 6,6 земного радиуса. Как показано исследованиями на «Пионере IV», такая орбита время от времени попадает в полосу весьма интенсивного облучения, создающего внутри защиты, соответствующей 1 г/см^2 материала среднего атомного номера Z , дозу порядка десяти рентген в час; эта доза, естественно, резко возрастает на внешней поверхности. Энергичная часть излучения состоит, по-видимому, в основном из электронов, обладающих энергиями, не превышающими 60 кэв. Тормозное излучение может быть весьма эффективно экранировано несколькими миллиметрами свинца (несколько граммов на 1 см^2).

Возможно, однако, что обычные геофизические условия представлены совсем не результатами наблюдений на «Пионере IV» (3 марта 1959 г.), полет которого происходил после интенсивной солнечной вспышки в конце февраля 1959 г., а скорее данными «Пионера I» (11 октября 1958 г.), «Пионера III» (6, 7 декабря 1958 г.) и «Мечты» (2 января 1959 г.). По данным последних указанных наблюдений, интенсивность излучения на высоте 6,6 земного радиуса была ниже своего максимального значения (соответствующего высоте 3,5 земного радиуса) примерно в пятьсот раз. Тем не менее можно ожидать значительные флуктуации в пределах досягаемости земного магнитного поля. Теоретический верхний предел возмущения интенсивности радиации в квазистационарном состоянии может быть получен приравниванием полной объемной плотности кинетической энергии заряженных частиц плотности магнитной энергии $B^2/8\pi$ в рассматриваемой точке. Этот результат не очень сильно проясняет дело с инженерной точки зрения, если мы не знаем кинетической энергии частиц. Имеющиеся данные указывают на то, что энергия электронов во внешней зоне редко превосходит 60 кэв, а в среднем она значительно меньше. Кинетическая энергия протонов может быть сравнимой с кинетической энергией электронов, но их проникающая способность и способность к тормозному излучению настолько меньше по сравнению с электронами, что их роль в проблеме облучения космических кораблей обычно сводится к влиянию на внешнюю поверхность оболочки спутника.

в) «Щель» между внутренней и внешней зонами излучения представляет собой область, в которой интенсивность излучения имеет относительный минимум. Эта щель пересекает экватор на радиальном удалении примерно 2,6 земного радиуса от центра Земли. Доза радиации в этой

области составляет примерно 0,4 рентгена в час внутри защиты, соответствующей 1 г/см^2 . Излучение в щели ослабляется примерно в четыре раза слоем свинца 4 г/см^2 и поэтому, по-видимому, представляет собой смесь проникающего излучения, которым характеризуется внутренняя зона, и более мягкого излучения внешней зоны. В настоящее время многие авторы считают, что «щель» не совсем благоприятное место для длительных полетов космических кораблей с людьми, хотя наличие такой зоны дает некоторые преимущества для кратковременных полетов.

г) Имеющиеся данные указывают на то, что орбиты спутников, имеющие перигей на высоте, большей чем 10—15 земных радиусов от центра Земли, подвержены действию захваченного излучения в пренебрежимо малой степени; однако существуют догадки о том, что взрывы солнечной плазмы, которые распространяются от Солнца через всю солнечную систему, могут приносить с собой достаточно энергичные частицы, которые могут таить в себе значительную, хотя, быть может, и кратковременную радиационную опасность. Межпланетные наблюдения, осуществленные на «Пионере III», «Пионере IV» и «Мечте», не подтверждают этих предположений, однако их наблюдения охватывают незначительный промежуток времени. Сейчас представляется более вероятным, что захваченные частицы приобретают большую часть наблюдаемой энергии в различного рода процессах ускорения, связанных с земным магнитным полем. Пока этот вопрос остается открытым и может быть доведен до окончательного решения лишь продолжительными измерениями излучения в межпланетном пространстве, вдали от Земли.

д) Приведем соображения, касающиеся путешествия в пространстве, в частности вопроса о том, как покинуть Землю. Если взять в качестве примера «Пионер IV», то область захвата может быть пройдена полностью за шесть часов, причем из них два часа корабль проводит в зоне излучения высокой интенсивности. Следовательно, кумулятивная доза на подобной траектории будет порядка десяти рентген в корабле с легкой защитой (примерно 1 г/см^2) и может быть при желании уменьшена за счет применения материала для оболочки с малым Z (например, бериллия, в котором способность к тормозному излучению значительно меньше).

е) В любом случае представляется разумным избегать внутренней зоны, что не представляет особой сложности ввиду конечной ее протяженности как по широте, так и в радиальном направлении.

ж) Гораздо труднее избежать попадания во внешнюю зону. В этом случае существуют «конусы пролета» над северным и южным магнитными полюсами Земли. Половина угла раскрытия этих конусов, обращенных вершиной к Земле, составляет около 20° . Подробности природы этих конусов до сих пор не исследованы прямыми наблюдениями. На основе исследования интенсивности захваченного излучения в радиальном направлении, а также на основе фундаментальной элементарной теории захвата магнитным полем Земли (эта теория в настоящее время считается хорошо обоснованной, так как она правильно описывает большинство особенностей излучения, представленных всеми наблюдениями) представляется вполне возможным, что внутри указанных конусов вероятность обнаружить захваченное излучение значительной интенсивности весьма мала. Независимо от этого упомянутый вывод необходимо проверить наблюдениями на спутниках, орбиты которых проходят около линии, соединяющей полюсы Земли. Не исключено также, что временами солнечная плазма входит в полярные области непосредственно, а не через области захвата. В этих редких случаях, примером которых может служить случай 23 февраля 1956 г., могут появляться аномальные, хотя и скоропреходящие, потоки космического излучения солнечного происхождения.

з) Эксперименты «Аргус»³¹ обнаружили, что чрезвычайно высокая интенсивность захваченных электронов высокой энергии может быть создана искусственно в некоторых избранных местах пространства в течение коротких промежутков времени. Значение этих результатов весьма велико. Детали этих экспериментов должны быть тщательно изучены всеми теми, кто несет ответственность за будущие полеты в космос.

9. Радиационный ущерб для электронного и иного оборудования. Электронное и другое физическое оборудование в общем гораздо устойчивее по отношению к облучению, чем люди и животные. Как правило, требуются кумулятивные дозы порядка миллионов рентген, чтобы вызвать какие-либо заметные явления; однако для существенного изменения характеристик полупроводников бывают достаточны дозы меньшего порядка величины. Мы надеемся, что ранее изложенные данные и материалы, приведенные в цитированной литературе, могут составить основу для любых инженерных прикидок.

Успешная работа солнечных батарей и передатчиков, установленных на «Авангарде I» (спутник 1958 г., бета), в течение почти годового периода (это относится к времени, когда пишется эта статья), а также успешное действие подобного оборудования на «Спутнике III» (спутник 1958 г., дельта) в течение примерно такого же времени дают наиболее ясное доказательство живучести электронного оборудования на космических кораблях. Полная доза облучения в этих двух случаях была значительно ниже того уровня, когда можно ожидать нарушения работы приборов.

10. Захваченное корпускулярное излучение вокруг Луны и вокруг других планет. Захват заряженных частиц в окрестности астрономических тел несомненно является общим астрофизическим явлением. Действительно, это явление было уже принято в качестве существенного механизма для динамики солнечной короны³⁶. Более непосредственный интерес со стороны астронавтов привлекает возможность существования захваченного корпускулярного излучения вокруг Луны, а также других планет (например, Марса и Венеры).

Возникновение нейтронов в атмосфере или на поверхности астрономических тел под действием космических лучей является, по всей вероятности, универсальным явлением (по крайней мере в нашей Галактике).

Кроме того, все тела, входящие в солнечную систему, подвержены действию потоков солнечной плазмы с большей или меньшей интенсивностью, зависящей от их удаления от Солнца. Следовательно, оба (предполагаемых наиболее существенными) источника захваченного излучения имеются на протяжении всей солнечной системы.

Главными параметрами при количественном рассмотрении явления захвата являются магнитный момент астрономического тела, радиус тела, плотность и радиальная протяженность его атмосферы.

Механизм захвата сейчас уже хорошо изучен, так что вполне уверенная оценка с разумной точностью может быть произведена для любого набора вышеуказанных параметров. В общем, чем больше магнитный момент и чем меньше протяженность атмосферы, тем более благоприятны условия для высокой интенсивности захваченного излучения. Остаются неясности относительно механизма локального ускорения заряженных частиц, который может оказаться особенно благоприятным около Земли, однако это предположение выглядит не очень правдоподобно.

По современным данным вероятно, что Луна окружена очень небольшим захваченным излучением или даже вовсе лишена такового, имея в виду предполагаемый малый магнитный момент Луны*). Однако Марс

*) Исследования с помощью советских космических ракет осенью 1959 г. показали, что магнитное поле вокруг Луны практически отсутствует. (Прим. пер.)

и Венера, например, могут иметь значительные пояса излучения. Наблюдения с целью выяснения этих вопросов являются одним из самых увлекательных направлений современной науки о космосе.

11. Космические полеты с релятивистскими скоростями. Время от времени приходится слышать, что будущие космические корабли, рассчитанные на путешествия на большие удаления, будут двигаться со скоростями, приближающимися к скорости света. Недавно было указано, что в связи с этим возникает дополнительная радиационная опасность; это замечание не привлекло к себе внимания. Чтобы понять, в чем состоит проблема, допустим, что плотность водорода в пространстве составляет один атом на кубический сантиметр—это значение обычно берется для нашей Галактики, если рассматриваются точки, достаточно удаленные от всех звезд. Если скорость космического корабля составляет три десятых скорости света, т. е. равна $90\,000\text{ км/сек}$, то поверхность корабля на его фронтальной части бомбардируется потоком $9 \cdot 10^3\text{ прот/см}^2\text{сек}$ и $9 \cdot 10^9\text{ электр/см}^2\text{сек}$. Только за счет скорости космического корабля протоны и электроны обладают кинетической энергией относительно корабля соответственно 45 Мэв и 25 кэв . Если корабль лишен какой-либо защиты, то доза радиации составляет около 20 миллионов рентген в час. Это потрясающая цифра! От электронов и вызываемого ими тормозного излучения можно эффективно заэкранироваться свинцом (1 г/см^2). Протоны могут проникать через 2 г/см^2 . Возможно, что наиболее сложной задачей является защита внешнего оборудования. По мере приближения скоростей космических кораблей к скорости света радиационная опасность начинает возрастать в ошеломляющих пропорциях.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 «Physics and Medicine of the Upper Atmosphere», edited by C. S. White and O. O. Benson, Jr., University of New Mexico Press, Albuquerque, 1952; J. A. Van Allen, The Nature and Intensity of the Cosmic Radiation, стр. 239—266; A. T. Krebs, The Biologic Effects of Laboratory Radiation, стр. 290—315; H. J. Schaeffer, The Biologic Effects of Cosmic Radiation, стр. 290—315. H. J. Muller, Genetic Effects of Cosmic Radiation, стр. 316—330; A. T. Krebs, Methods of Assessing the Biologic Effects of Ionizing Radiation, стр. 461—469; E. P. Ney, Cosmic Ray Ionization and the Methods of Measuring It, стр. 471—478; T. C. Evans, A Discussion of the Potential Effects on Man of Ionizing Radiation Present in the Upper Atmosphere, стр. 533—539.
- 2 «Vistas in Astronautics», edited by M. Alperin, M. Stern, and H. Wooster (Pergamon Press, New York, 1958); H. J. Schaeffer, Appraisal of Cosmic Ray Hazards in Extra-Atmospheric Flight, стр. 291—298. D. G. Simons, Areas of Current Space Medical Research, стр. 299—303.
- 3 P. Meyer, E. N. Parker, and J. A. Simpson, Solar Cosmic Rays of February, 1956 and Their Propagation through Interplanetary Space, Phys. Rev. **104**, 768—783 (1956).
- 4 J. R. Winckler, Cosmic Ray Increase at High Altitude on February 23, 1956, Phys. Rev. **104**, 220 (1956).
- 5 J. A. Van Allen and C. E. McIlwain, Cosmic Ray Intensity at High Altitudes on February 23, 1956, J. Geophys. Res. **61**, 569—571 (1956).
- 6 J. A. Van Allen and J. R. Winckler, Spectrum of Low-Rigidity Cosmic Rays during the Solar Flare of February 23, 1956, Phys. Rev. **106**, 1072—1073 (1957).
- 7 K. A. Anderson, Ionizing Radiation Associated with Solar Radio Noise Storm, Phys. Rev. Lett. **1**, 335—337 (1958).
- 8 P. S. Freier, E. P. Ney and J. R. Winckler, Cosmic Ray Protons from the Sun, Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, **4**, No. 4, 237 (1959).
- 9 K. A. Anderson, R. Arnoldy, R. Hoffman, L. E. Peterson and J. R. Winckler, Observations of Low-Energy Solar Cosmic Rays from the Flare of August 22, 1958, part I, Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, **4**, No. 4, 238 (1959).
- 10 J. R. Winckler, L. E. Peterson, R. Hoffman, R. Arnoldy and K. A. Anderson, Observations of Low-Energy Solar Cosmic Rays from the Flare of August 22, 1958, part II, Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, **4**, No. 4, 238 (1959).

11. C. E. McIlwain and P. Rothwell, Satellite Observations of Time Variations of Charged Particle Intensities at High Latitudes, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, Ser. II, 4, No. 4, 238 (1959).
12. L. H. Meredith, M. B. Gottlieb and J. A. Van Allen, Direct Detection of Soft Radiation Above 50 Kilometers in the Auroral Zone, *Phys. Rev.* 97, 201—205 (1955).
13. J. A. Van Allen, Direct Detection of Auroral Radiation with Rocket Equipment, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 43, 57—92 (1957).
14. J. R. Winckler, L. Peterson, R. Arnoldy and R. Hoffman, X-Rays from Visible Aurorae at Minneapolis, *Phys. Rev.* 110, 1221—1231 (1958).
15. J. R. Winckler and L. Peterson, Large Auroral Effect on Cosmic Ray Detectors Observed at 8 g/cm² Atmospheric Depth, *Phys. Rev.* 108, 903—904 (1957).
16. K. A. Anderson, Soft Radiation Events at High Altitude during the Magnetic Storm of August 29—30, 1957, *Phys. Rev.* 111, 1397—1405 (1958).
17. C. E. McIlwain, Direct Measurement of Radiation Associated with Visible Aurorae, I.G.Y. Rocket Report Series, No. 1, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington 25, D.C. (30 July 1958), стр. 164—168.
18. L. H. Meredith, L. R. Davis, J. P. Heppner and O. E. Berg, Rocket Auroral Investigations, *ibid*, стр. 169—178.
19. J. A. Van Allen, paper presented at joint meeting of National Academy of Sciences and American Physical Society on 1 May 1958.
20. J. A. Van Allen, G. H. Ludwig, E. C. Ray and C. E. McIlwain, Observation of High Intensity Radiation by Satellites 1958 Alpha and Gamma, *Jet Propulsion* 28, 588—592 (1958).
21. J. A. Van Allen, C. E. McIlwain and G. H. Ludwig, Radiation Observations with Satellite 1958 Epsilon, *J. Geophys. Res.* 64, 271—286 (1959).
22. J. A. Van Allen and L. A. Frank, Radiation Around the Earth to a Radial Distance of 107, 400 Kilometers, *Nature* 183, 430—434 (1959).
23. P. J. Coleman, Jr., C. P. Sonnett and A. Rosen, Ionizing Radiation at Altitudes of 3500 to 36 000 km: «Pioneer I», *Bull. Amer. Phys. Soc.*, Ser. II, 4, No. 4, 223 (1959).
24. A. Rosen, C. P. Sonnett and P. J. Coleman, Jr., Ionizing Radiation Detected by «Pioneer II», *Bull. Amer. Phys. Soc.*, Ser. II, 4, No. 4, 223 (1959).
25. S. F. Singer, Radiation Belt and Trapped Cosmic Ray Albedo, *Phys. Rev. Lett.* 1, 171—173 (1958).
26. S. F. Singer, Trapped Albedo Theory of the Radiation Belt, *Phys. Rev. Lett.* 1, 181—183 (1958).
27. С. Н. Вернов, Специальная лекция, Пятая Генеральная ассамблея CSAGI в Москве 30 июня—9 августа 1958 г.
28. С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков, П. В. Вакулов и Ю. И. Логачев, Изучение земного корпускулярного излучения и космических лучей при полете космической ракеты, *ДАН СССР* 125, 304—307 (1959).
29. P. J. Kellogg, Possible Explanation of the Radiation Observed by Van Allen at High Altitudes in Satellites, *Nuovo cimento* (in press).
30. T. Gold, Origin of the Radiation Near the Earth Discovered by Means of Satellites, *Nature* 183, 355—358 (1959).
31. National Academy of Sciences 29 April 1959, Washington, D. C. Symposium on Scientific Effects of Artificially Introduced Radiations at High Altitudes. R. W. Porter, Introduction; N. Christofilos, The Argus Experiment; J. A. Van Allen, C. E. McIlwain and G. H. Ludwig, Satellite Observations of Radiation Artificially Injected into the Geomagnetic Field; L. Allen, Jr., Measurement of Trapped Electrons from a Nuclear Device by Sounding Rockets; J. A. Welch, Jr., Theory of Geomagnetically Trapped Electrons from and Artificial Source; P. Newman, Optical, Electromagnetic and Satellite Observations of High Altitude Nuclear Detonations, part I; A. M. Peterson, Optical, Electromagnetic and Satellite Observations of High Altitude Nuclear Detonations, part II.
32. S. Chapman and J. Bartels, *Geomagnetism*, vol. I and II, Oxford at the Clarendon Press, 1940.
33. S. K. Mitra, *The Upper Atmosphere*, The Asiatic Society Monograph Series, vol. V, 2nd edition, Calcutta, 1951.
34. H. V. Neher, частное сообщение (April 1958).
35. N. Christofilos, частное сообщение (April 1958).
36. P. J. Kellogg and E. P. Ney, A New Theory of the Solar Corona (March 1959, частное сообщение