

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523 165

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СТРАТОСФЕРЕ,
ВЫЗЫВАЕМЫХ ПРОЦЕССАМИ НА СОЛНЦЕ***А. Н. Чаракчян*

Наблюдаемые в стратосфере флуктуации интенсивности космических лучей можно разделить на два типа.

Первый — это относительно редкие случаи аномально больших возростаний интенсивности космических лучей, наблюдаемые в основном на высоких широтах, так называемые *вспышки космических лучей*, генерируемых Солнцем. Во время этих вспышек интенсивность первичного космического излучения, по сравнению с обычной, увеличивается в десятки, сотни и даже тысячи раз.

Второй — это флуктуации интенсивности космических лучей галактического происхождения. Они имеют более плавный характер и меньшую амплитуду.

а) 27-дневные вариации с амплитудой в 5—10%, вызываемые воздействием на галактические космические лучи межпланетных магнитных полей. Эти поля обусловлены извержением частиц из Солнца и поэтому изменяются в связи с вращением Солнца вокруг своей оси и вызываются, по-видимому, относительно долгоживущими активными областями Солнца — флоккулами.

б) Внезапные понижения интенсивности космических лучей во время магнитных бурь, с амплитудами до 30—40% — так называемые *форбуш-спады*, которые обязаны модулирующему действию на космические лучи электромагнитных полей, несомых облаками солнечных плазм.

в) Вековое изменение интенсивности космических лучей, с амплитудой, примерно, в два раза большей, связанное с 11-летним циклом активности Солнца. С уменьшением активности Солнца уменьшается экранирующее действие межпланетных магнитных полей, затрудняющих приход к Земле галактических космических лучей. Поэтому в период уменьшения активности Солнца интенсивность космических лучей в солнечной системе увеличивается.

1. ВСПЫШКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Вспышки космических лучей в стратосфере были обнаружены в СССР и независимо в США в 1958 г., в опытах в стратосфере над Мурманском, Миннеаполисом и Форт-Черчиллем. Интенсивность первичной компоненты космических лучей в районе Мурманска превышала среднюю приблизительно в 2500 раз 3 марта и в 40 раз 17 марта и 8 июля 1958 г.^{1,2} В 1959 г. во время вспышек 10, 15 и 17 июля интенсивность первичной компоненты космических лучей превышала среднюю приблизительно

в 200, 800 и 2800 раз соответственно. Продолжительность вспышек бывает разная, от нескольких часов до нескольких суток³⁻⁵. В космическом пространстве вспышка космических лучей впервые была зарегистрирована 7 июля 1958 г. при помощи аппаратуры, установленной на Третьем советском спутнике Земли⁶.

Согласно данным мировой печати, с 1958 г. до начала 1962 г. зарегистрировано 26 вспышек космических лучей в стратосфере. 23 из них были обнаружены в опытах над Мурманском.

Исследование вспышек космических лучей представляет большой интерес как в связи с общей проблемой генерации космических лучей, так и в связи с изучением физических явлений на Солнце. Эти исследования, кроме того, имеют и практическое значение для задач защиты космонавтов в космическом пространстве от радиационной опасности во время вспышек.

Вопрос о радиационной защите космонавтов от излучений вспышек космических лучей во время полетов в межпланетном пространстве в принципе мог бы решиться на основе накопленного материала о продолжительности, амплитуде и энергетическом спектре частиц во вспышках. Основываясь на этих данных, можно сказать, что для гарантированной защиты от солнечных космических лучей необходимо применять защитные экраны от излучения. Однако такой путь привел бы к чрезмерному утяжелению космических кораблей. Поэтому для космических полетов в ближайшем будущем чрезвычайно важно изыскание путей прогнозирования вспышек космических лучей, предсказания мощности вспышки и характера ее распространения в межпланетном пространстве. Это является новой задачей, для успешного решения которой требуется комплексное и систематическое изучение активности Солнца с помощью методов астрономических, радиоастрономических и изучения космических лучей.

Излагаемые данные о флуктуациях космических лучей основаны на результатах свыше 4 тысяч измерений, проведенных в стратосфере. Прибор, получивший название радиозонда космических лучей (РК), при помощи которого оказалось возможным осуществление столь большого числа измерений, небольшой, он весит около двух килограммов⁷. Он содержит газоразрядный счетчик размером $1,8 \times 10 \text{ см}^2$. В некоторых приборах применялся и счетчиковый телескоп, состоящий из двух таких же счетчиков. В последнем случае в приборах периодически производились измерения то числа двойных совпадений, то числа разрядов в одиночном счетчике. Таким образом данные, полученные с помощью приборов обоих типов, легко сопоставлялись друг с другом.

Регулярные измерения в СССР проводятся с середины 1957 г. по программе Международного геофизического года, первоначально на геомагнитных широтах 64 и 51° (Мурманск, Москва), а с апреля 1958 г. также на широте 41° (Симеиз).

Пороговые энергии для первичных протонов на указанных широтах, по данным расчетов в работе⁸, равны 0,1, 1,5 и 4,6 *Бэв* соответственно.

§ 1. Радиозонд космических лучей (РК)

Схема описываемого радиозонда со счетчиковым телескопом (РК-2) представлена на рис. 1. Счетчики S_1 и S_2 включены в цепи сеток ламп L_1 и L_2 . Анодные и экранные цепи этих ламп соединены между собой. С помощью одновибратора, состоящего из ламп L_1 , L_2 и L_3 , производится формирование импульсов нужной продолжительности (10^{-3} сек) и амплитуды. Импульсы на выходе трансформатора Tr открывают запертую лам-

пу L_4 УКВ радиопередатчика. Сигналы радиопередатчика регистрируются на Земле при помощи приемника УКВ, на выходе которого включена пересчетная система с механическим нумератором.

Данные о высотах, на которых производятся измерения, получаются с помощью барографа, находящегося в приборе. Из рис. 1 видно, что когда стрелка барографа проходит по контактам барографа, лампа L_2 заширается (смещением в 40 в) и тогда измеряется число разрядов в одиночном счетчике S_1 . Когда стрелка проходит по изолятору, обе лампы

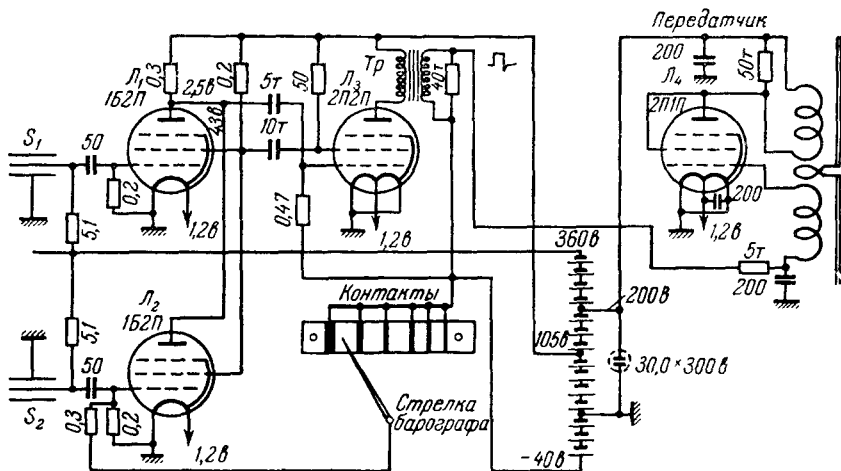


Рис. 1. Схема радиозонда.

L_1 и L_2 оказываются открытыми. В этом случае регистрируются лишь двойные совпадения $S_1 + S_2$. Так как при скольжении стрелки барографа с контакта на изолятор и обратно происходят резкие изменения темпа счета числа импульсов, легко по этим признакам фиксировать моменты прохождения стрелки барографа по контактам и соответственно по изоляторам. В приборе РК-2 измерение числа двойных совпадений (положение стрелки на изоляторе) занимало 75% всего времени, а 25% времени приходится на измерение числа частиц одиночным счетчиком.

Схема радиозонда РК-1, предназначенная для измерений с помощью одиночного счетчика, более простая. В этом случае отпадает необходимость в лампе L_1 . На рис. 1 видно, что прохождение стрелки барографа по контактам дает паузу в передаче радиосигналов. Пользуясь фиксированными моментами наступления этих пауз, получаем данные о высотах полета.

Таким образом, при помощи радиосигнала одного вида получают информации как о темпе счета числа частиц, так и о высотах, на которых производится измерение. Этот прием позволил упростить как схему радиозонда, так и схему наземной аппаратуры.

§ 2. Вспышки космических лучей в стратосфере и коррелированные с ними явления

Вспышки космических лучей в стратосфере обычно наступают приблизительно через 1 ÷ 10 час после начала солнечных хромосферных вспышек и продолжаются от нескольких часов до нескольких дней³. Приблизительно через сутки после хромосферной вспышки начинается геомагнитная буря и полярные сияния. К началу возникновения магнитных бурь или несколько позже обычно наступает внезапное понижение

интенсивности космических лучей, регистрируемых вблизи уровня моря, а также в стратосфере на средних и малых широтах.

Не все вспышки космических лучей в стратосфере коррелируют с магнитными бурями и форбуш-спадами. Эта корреляция является наибольшей, когда хромосферная вспышка, вызвавшая вспышку космических лучей, происходит в районе центрального меридиана солнечного диска.

Вскоре после начала хромосферной вспышки резко увеличивается радиоизлучение Солнца, сопровождаемое ионосферными возмущениями. Затем наступает период поглощения космического радиоизлучения в полярных областях^{9, 10}. Последнее явление связывается с приходом от Солнца протонов с энергиями ~ 10 Мэв^{9, 11}. Как правило, вспышки космических лучей сопровождаются всплеском радиоизлучения IV типа.

§ 3. Исследование энергетического спектра протонов во вспышках

Анализ первых данных, полученных как с помощью одиночного счетчика, так и счетчикового телескопа, показал, что регистрируемое

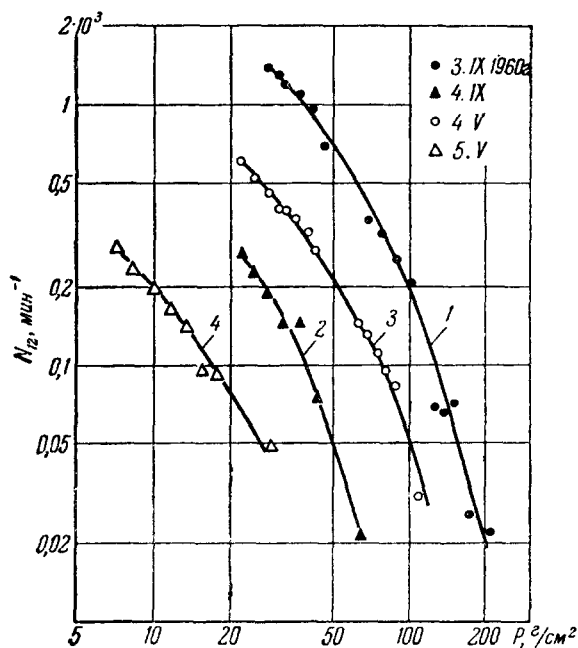


Рис. 2. Число совпадений N_{12} в зависимости от давления.

1—3.IX 1960 г., старт прибора 07^h00'; 2—4.IX 1960 г., старт прибора 11^h56'; 3—4.V 1960 г., старт прибора 15^h00'; 4—5.V 1960 г., старт прибора 10^h20'.

в стратосфере излучение вспышек скорее всего состоит из протонов^{1, 3, 4}. Винклер успешно экспонировал фотоядерные эмульсии в стратосфере во время вспышек космических лучей (12 мая 1959 г.) и получил с помощью этого метода непосредственные данные о зарядовом распределении частиц солнечных космических лучей¹². Из его опытов следует, что большинство зарегистрированных частиц являются протонами. В дальнейшем этот метод получил в США широкое распространение как при опытах на шаррах-зондах, так и при опытах, проводимых с помощью геофизических ракет¹³.

Одним из методов изучения энергетического спектра первичных протонов во вспышке является измерение поглощения этих протонов в верхних

слоях атмосферы^{3, 14}. Интенсивность космических лучей галактического происхождения в стратосфере имеет максимум на высотах 16—22 км. При больших высотах эта интенсивность значительно уменьшается. Во время вспышек интенсивность космических лучей в стратосфере, на высоких широтах, не имеет максимума; с высотой она непрерывно увеличивается. Вычитая из измеренного числа частиц на различных

высотах во время вспышек соответствующие данные до вспышки, строятся так называемая кривая поглощения — зависимость числа зарегистрированных частиц от давления в стратосфере. В период вспышек проводятся более частые запуски радиозондов в стратосферу, в ряде случаев каждые 3—4 часа. Это позволяет получать информацию об изменениях как интенсивности, так и спектра первичного излучения во времени. Графики на рис. 2 иллюстрируют вид кривых поглощений, полученных при некоторых измерениях во время вспышек 4 мая и 3 сентября 1960 г. По ординате отложено число двойных совпадений, по абсциссе давление в $\Gamma/\text{см}^2$. Данные об интенсивности первичного излучения получают посредством экстраполяции кривых поглощения до давления $5 \Gamma/\text{см}^2$, что соответствует пробегу протонов с энергиями 90 Мэв.

Примечательным для кривых поглощений, которые получаются в разное время вспышки, является то, что их наклоны мало различаются между собой, хотя интенсивности первичных протонов со временем существенно изменяются. Следовательно и энергетические спектры первичных протонов во времени не претерпевают существенных изменений. Удивительным является и то, что эти энергетические спектры получаются близкими между собою и для разных вспышек. Такое явление свидетельствует об универсальности формирования энергетического спектра космических лучей Солнца^{15,16}.

Постоянство энергетического спектра протонов трудно объяснить с точки зрения того, что спектр формируется во время самой вспышки¹⁷. По Сыроватскому, спектр формируется скорее всего в процессе выхода частиц из магнитной ловушки, куда они инжектируются, будучи ускоренными. Полученный им на этой основе вид энергетического спектра¹⁸ в общем согласуется с данными эксперимента. Но ввиду важности вопроса о постоянстве энергетического спектра следует рассмотреть и другие возможности. Однозначная интерпретация постоянства энергетического спектра протонов, генерированных Солнцем, для разных вспышек представляет, на наш взгляд, большой теоретический интерес.

Данные, которые изображены на рис. 2, были получены в измерениях до начала геомагнитных бурь и соответственно форбуш-спадов, иными словами, до начала прихода солнечных корпускулярных потоков на Землю. На рис. 3 даны результаты измерения кривых поглощения, полученные в период геомагнитных бурь и форбуш-спадов (данные 12 мая, 12 июля, 15 июля 1959 г.). Наклоны прямых, проведенных через экспериментальные точки, также мало различаются между собою, но крутизна спектра в этом случае существенно больше.

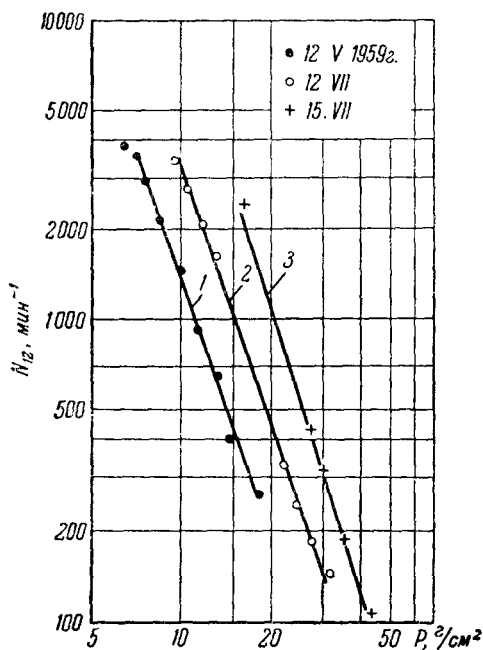


Рис. 3. Измеренное число двойных совпадений N_{12} в зависимости от давления.

1—12 мая 1959 г., старт прибора $12^h 00'$; 2—12 июля 1959 г., старт прибора $11^h 45'$; 3—15 июля 1959 г., старт прибора $12^h 00'$.

Оба вида спектра — относительно пологий до магнитной бури и крутой во время магнитной бури для одной и той же вспышки — впервые наблюдались в экспериментах 11—12

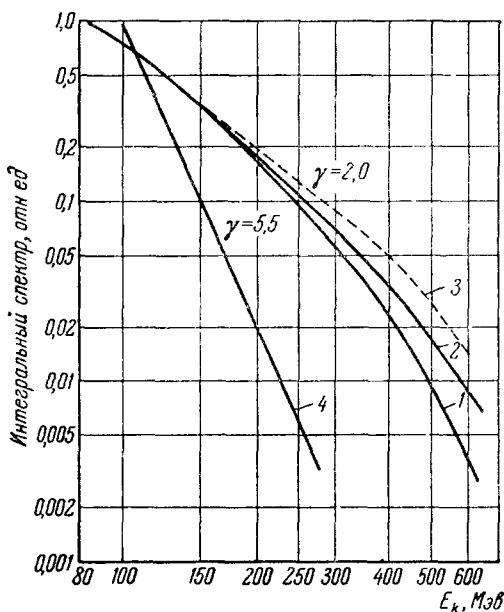


Рис. 4. Интегральные энергетические спектры протонов.

1 — Усредненный спектр по данным измерений в отсутствие магнитной бури и форбуш-спада; 2 — то же с учетом, помимо ионизационных потерь, поглощения протонов в ядерных столкновениях в атмосфере; 3 — получено из 2 с приближенным учетом времени диффузионного распространения протонов в пространстве в зависимости от их скорости; 4 — усредненный спектр по данным измерений во время магнитной бури и форбуш-понижения.

нов космических лучей Солнца существенно различны до и в период форбуш-понижений. В первом случае показатель интегрального спектра $\gamma \approx 2,0$, во втором $\gamma \approx 5,0$.

§ 4. Интерпретация эффекта смягчения энергетического спектра во время форбуш-спадов

Согласно многочисленным данным непрерывных измерений космических лучей вблизи уровня моря степень понижения интенсивности галактических космических лучей во время форбуш-спадов тем больше, чем меньше их энергия²². Следовательно, энергетический спектр космических лучей галактического происхождения во время форбуш-спада становится более пологим. Но для космических лучей, генерированных Солнцем, как было показано выше, картина обратная, а именно: спектр космических лучей Солнца во время магнитной бури обогащается частицами меньших энергий, в силу чего он становится более мягким.

Протоны космических лучей Солнца приходят на Землю раньше, чем корпускулярные потоки от хромосферной вспышки, вызвавшей эту вспышку космических лучей. Следовательно, к моменту прихода корпускулярных потоков на Землю пространство вокруг Солнца, по крайней

м были в экспериментах 11—12 июля 1959 г.^{3,4}. Позже такой же результат получился по данным измерений вспышки 15 ноября 1960 г.^{19,20}, а также в эксперименте Нея и Штейна²¹ 12 ноября 1960 г. над Миннеаполисом. Заметим, что в ряде случаев удается выяснить, что смягчение спектра протонов во время магнитной бури сопровождается одновременно существенным увеличением интенсивности регистрируемых протонов^{19,20}.

Усредненные по данным различных вспышек интегральные спектры протонов приведены на рис. 4^{15,16}. По оси ординат отложена интенсивность числа первичных протонов в относительных единицах, по оси абсцисс — кинетическая энергия протонов в Мэв. Спектр 1 с показателем $\gamma \approx 5,5$ получается по данным измерений во время форбуш-понижений. Спектры 2 соответствуют результатам измерений, получаемым в отсутствие форбуш-спада.

Таким образом, мы приходим к следующему выводу: энергетические спектры прото-

мере в пределах нескольких астрономических единиц, заполнено космическими лучами от Солнца. Обнаруженный факт смягчения энергетического спектра протонов во время форбуш-понижения можно объяснить только предположением о новом источнике протонов, связанным с самим корпускулярным потоком хромосферной вспышки. Корпускулярные потоки, охватывающие в это время Землю, исходят от хромосферной вспышки, в которой были генерированы космические лучи. Можно поэтому представить себе следующую картину: часть протонов космических лучей, генерированных во время хромосферной вспышки, покидает Солнце и, диффундируя в межпланетной среде, приходит на Землю. Для этих протонов интегральный энергетический спектр имеет показатель $\gamma \approx 2,0$. Другая часть протонов, будучи захваченной магнитными облаками корпускулярных потоков, не может выйти свободно в межпланетное пространство. Эти частицы, пойманные в своеобразные магнитные ловушки, уносятся в межпланетное пространство вместе с самими корпускулярными потоками. Они регистрируются тогда, когда Земля оказывается внутри этих потоков. Энергетический спектр протонов, находящихся в ловушках, соответствует наклону $\gamma \approx 5,0$.

Таким образом, мы приходим к представлению о существовании магнитных ловушек *) быстрых протонов в корпускулярном потоке хромосферной вспышки, распространяющемся в межпланетном пространстве ^{3, 14-16, 19, 20}.

§ 5. Генерация космических лучей Солнца малых и больших энергий

Большинство вспышек космических лучей, обнаруживаемых в стратосфере, не регистрируются при помощи наземных приборов. Это объясняется поглощением первичных частиц в толще атмосферы. Но в ряде случаев вспышки были зарегистрированы одновременно и при помощи наземной аппаратуры. Вопрос, который рассматривается сейчас, заключается в следующем: имеется ли корреляция в амплитудах вспышек, измеряемых в стратосфере и вблизи уровня моря? Сравнение показывает, что по-видимому, определенной связи между ними нет. Это иллюстрируется данными табл. I, где приведены даты вспышек космических лучей,

Таблица I

Дата хромосферной вспышки	$m_{ст.}$	$m_{у. м.}, \%$	Дата хромосферной вспышки	$m_{ст.}$	$m_{у. м.}, \%$
17.III 1958 г., 10 ^h 25'	35	<2	3.IX 1960 г., 00 ^h 40'	70	3
7.VII 1958 г., 0 ^h 58'	40	<1	12.XI 1960 г., 13 ^h 22'	1200	130
11.V 1959 г., 20 ^h 55'	40	<1	15.XI 1960 г., 02 ^h 07'	500	80
10.VII 1959 г., 02 ^h	200	<1	20.XI 1960 г.	7	5
14.VII 1959 г., 04 ^h	200	<1	18.VII 1961 г., 09 ^h 30'	140	12
16.VII 1959 г., 21 ^h	2800	5	20.VII 1961 г., 15 ^h 50'	13	3
4.V 1960 г., 10 ^h 15'	35	10			

*) Часто магнитными ловушками корпускулярных потоков называют магнитные поля в виде петель, тянущихся от Солнца при распространении корпускулярных потоков (Мак-Кракен²³). Такие магнитные «петли», по представлениям автора, являются гигантскими ловушками для частиц, генерированных во время последующей хромосферной вспышки, происшедшей в той же активной области на Солнце. Как это ясно из изложенного, обсуждаемые нами магнитные ловушки имеют другую природу. Они, в частности, формируются в той же хромосферной вспышке, в которой генерированы космические лучи.

наибольшее увеличение интенсивности первичных космических лучей по измерениям в стратосфере в единицах нормальной интенсивности — $m_{ст}$ и возрастание интенсивности космических лучей, получаемое вблизи уровня моря, выраженное в процентах (по данным нейтронного монитора) $m_{у.м.}$ Видно, что вспышки с большими амплитудами, зарегистрированные в стратосфере в 1958—1959 гг., не дают вклада в интенсивность космических лучей на Земле. Между тем в ряде случаев вспышки у земли регистрируются при гораздо меньших амплитудах, получаемых по данным в стратосфере (4.V 1960 г., 20.XI 1960 г., 20.VII 1961 г.).

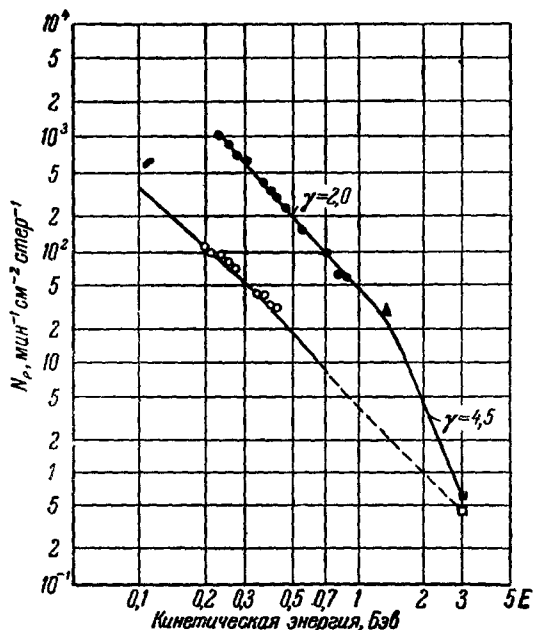


Рис. 5. Интегральные энергетические спектры протонов по совокупности данных измерений в стратосфере и вблизи уровня моря: 1 — по вспышке 4 мая 1960 г., 2 — по вспышке 15 ноября 1960 г.

ния ($\gamma \approx 2,0$). Но в области больших энергий они совершенно разные. Относительно большая крутизна спектра по вспышке 15 ноября в области больших энергий согласуется с данными о спектре по измерениям у земли. Вместе с тем для вспышки 4 мая такого согласия нет. Эти противоречивые результаты для наклонов спектра в области больших энергий также говорят в пользу того, что во вспышках нет, по-видимому, определенной зависимости между интенсивностями протонов, генерированных в области малых и больших энергий.

§ 6. Эффекты вторжения в стратосферу короткопробежных электронов во время фобуш-спадов

Наблюдения, проводимые на различных этапах развития вспышки при помощи счетчикового телескопа с фильтром 7 мм Al и одиночным тонкостенным счетчиком, показали, что в периоды фобуш-спада в стратосферу вторгаются, помимо протонов, короткопробежные частицы, пробег которых меньше 7 мм Al^{15,16}.

На рис. 5 приведены энергетические спектры протонов, полученные по совокупности данных измерений в стратосфере и у земли, по вспышкам 4 мая и 15 ноября 1960 г. По ординате отложено число протонов от Солнца с энергиями выше данной, по оси абсцисс — их кинетическая энергия. Сплошные точки и кружки соответствуют данным измерений в стратосфере на широте 64°. Треугольник соответствует результатам измерений в стратосфере на широте 51°. Зачерненные и светлые квадратики соответствуют данным измерений у земли. (Результаты, приведенные на рисунке, соответствуют временам измерений для максимумов амплитуд вспышки в стратосфере и на Земле^{19,20}.) Как видно на рисунке, наклоны спектров в области малых энергий по вспышкам 4 мая и 15 ноября 1960 г. имеют близкие значения

Во время фэрбуш-спада число частиц, измеренных при помощи тонкостенного счетчика, примерно в два раза больше по сравнению с данными, получаемыми при помощи телескопа. Для вспышки 15.VII 1959 г. это различие достигло почти шести.

Описанное явление мало изучено, хотя и выяснено, что оно коррелирует с явлениями, связанными с приходом солнечных корпускулярных потоков на Землю. Но вопрос о том, связано ли появление в стратосфере потока короткопробежных частиц (по-видимому, фотонов или электронов) непосредственно с солнечными корпускулярными потоками или оно вызывается явлениями, связанными с возмущениями внешнего радиационного пояса Земли ²⁴, остается открытым.

§ 7. Интенсивности первичных протонов в зависимости от времени

Можно при помощи кривых поглощений, измеренных в разные периоды развития вспышки, и экстраполяции этих кривых до достаточно больших высот получить данные о временной зависимости интенсивности первичных протонов во вспышках $N_p(t)$. Значения $N_p(t)$, полученные

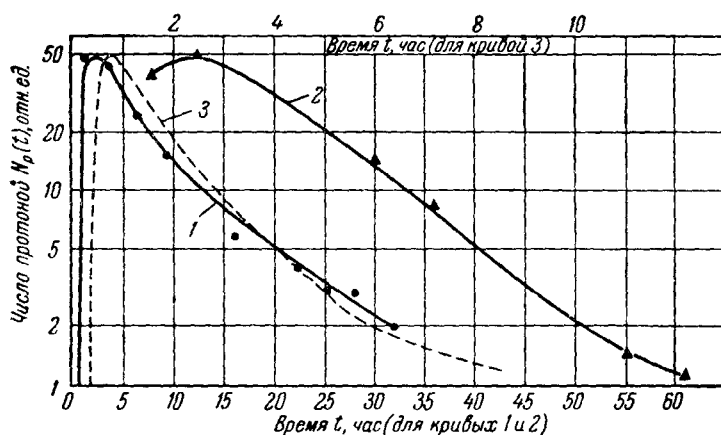


Рис. 6. Интенсивности протонов в зависимости от времени по данным в атмосфере.

1 — Вспышка 4 мая 1960 г., 2 — вспышка 3 сентября 1960 г.; 3 — данные вблизи уровня моря по вспышке 23 февраля 1956 г. (Чикаго).

в измерениях 4—5 мая и 3—5 сентября 1960 г., приведены на рис. 6. Начало времени $t = 0$ соответствует началу хромосферной вспышки.

Ошибки в данных, приведенных на рис. 6, связаны в основном с экстраполяцией результатов измерений (до давления 5 Г/см^2). Для большинства точек эти ошибки составляют около 20—30%. Большая продолжительность вспышки в сентябре по сравнению со вспышкой в мае происходит в основном за счет пологого участка кривой 2.

Интересно сопоставить данные о $N_p(t)$, полученные в стратосфере для первичных протонов с энергиями в сотни Мэв , с данными о вспышке 23 февраля 1956 г., полученными для первичных протонов со значительно большими энергиями ($> 3\text{—}4 \text{ Бэв}$). Из графиков рис. 6 видно, что интенсивность протонов больших энергий убывает со временем примерно в пять раз быстрее, чем для частиц малых энергий.

§ 8. Диффузия протонов космических лучей
Солнца в межпланетной среде. Данные
о коэффициенте диффузии. Напряженность
полей в магнитных неоднородностях

По вспышкам космических лучей, зарегистрированным вблизи уровня моря, например 23.II 1956 г., хорошо известно, что дополнительный поток космических лучей за максимумом интенсивности в широком интервале времени описывается зависимостью типа $A/t^{3/2}$. Распределение первичного излучения в пространстве в это время, как оказывается, почти изотропно²⁵. Эти данные убедительно показали, что распространение протонов космических лучей Солнца в межпланетной среде носит диффузный характер. По данным о временной зависимости развития вспышки, получаемым многими авторами в опытах по непрерывной регистрации космических лучей, были найдены характерные размеры магнитных неоднородностей в межпланетном пространстве, на которых рассеиваются протоны с энергиями в несколько $Bэв$ ^{26,27}. Идя по этому пути и пользуясь результатами опытов в стратосфере, в настоящее время получены новые данные о магнитных неоднородностях в межпланетной среде, эффективных в отношении рассеяния протонов существенно меньших энергий.

Решение дифференциального уравнения диффузии для однородного пространства с шаровой симметрией

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial N_p}{\partial r} \right)$$

с инжекцией числа частиц B в точке $r = 0$ при $t = t_0$ имеет вид

$$N_p(R, t - t_0) = \frac{1}{8} B [\pi D (t - t_0)]^{-3/2} \exp \left[-\frac{R^2}{4D(t - t_0)} \right]; \quad (1)$$

$N_p(R, t - t_0)$ в нашем случае есть интенсивность первичных протонов в зависимости от времени у Земли, R — расстояние от Солнца до Земли; t — время наблюдения, t_0 — начальное время, D — коэффициент диффузии

$$D = \frac{lv}{3}. \quad (2)$$

Здесь l — длина свободного пробега протонов до рассеяния, v — скорость протонов.

Естественно, для эффектов рассеяния протонов на магнитных неоднородностях нужно, чтобы $l \gg \frac{p}{300H}$, где H — напряженность магнитных полей в облаках, p — импульс протонов.

Допущенное выше предположение о равномерном распределении магнитных облаков в пространстве ($D = \text{const}$) не следует из каких-либо экспериментальных данных. Наоборот, при таком предположении нельзя, по-видимому, объяснить некоторые стороны эксперимента. Однако для выявления основных черт явления такое упрощение, видимо, оправдывает себя.

Для $t - t_0 \ll R^2/4D$ поведение $N_p(R, t - t_0)$ в (1) в основном определяется экспонентой. Для этого случая весьма существенным являются данные о t_0 . Величина $N_p(t - t_0)$ имеет максимум при $t - t_0 = R^2/6D$, а при $t - t_0 \gg R^2/4D$ имеем

$$N_p(t - t_0) = \frac{B}{8} / [\pi D (t - t_0)]^{3/2}. \quad (3)$$

Постоянная B в этом выражении определяется экспериментально, например по данным для максимума $N_p(t - t_0)$. Для вспышки 4 мая $B = 2,5 \cdot 10^{32}$ протонов или — кинетическая энергия, уносимая ими, составил $6 \cdot 10^{28}$ эрг.

На рис. 7 приведены графики, полученные по формуле (1) для трех значений t_0 . Там же приведены экспериментальные данные по вспышкам 4 мая и 3 сентября. Наилучшее согласие кривых с результатами эксперимента получается для коэффициента диффузии $D = 5,5 \cdot 10^{21}$ см²сек⁻¹. Для вспышки 4 мая время отсчитывается от начала хромосферной вспышки. Для данных 3 сентября за начало отсчета взято время спустя 20 час

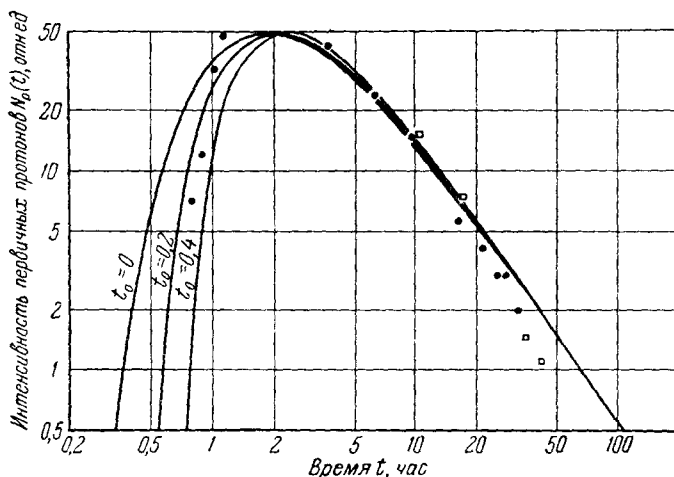


Рис. 7. Интенсивность первичных протонов в зависимости от времени, рассчитанная по формуле (1).

$D = 5,5 \cdot 10^{21}$ см²сек⁻¹, $t_0 = 0; 0,2$ и $0,4$; ● — данные эксперимента по вспышке 4 мая 1960 г.; □ — данные эксперимента по вспышке 3 сентября 1960 г.

после начала хромосферной вспышки. Последнее связано с тем, как видно из рис. 6, что вспышка 3 сентября имеет большую продолжительность по сравнению со вспышкой 4 мая в основном за счет пологого участка кривой в начале. Поэтому сравнение следует сделать лишь в отношении спадающих участков кривых. Как видно из рис. 7, при сдвиге во времени данных 3 сентября на 20 час данные обеих вспышек почти совпадают между собой.

Зная величину D и полагая $v = 0,5c = 1,5 \cdot 10^{10}$ см/сек (для протонов с энергией 100 Мэв), находим из (2) длину свободного пробега рассеяния для протонов малых энергий $l \approx 10^{12}$ см, что соответствует около одной десятой а. е. Из условия $H > P/300l$ и $P_1 = 5 \cdot 10^8$ эв/с получаем данные для величин напряженности магнитного поля $H > > 1,5 \cdot 10^{-6}$ гс.

Используя формулу (3) и данные эксперимента, по спадающим участкам кривой на рис. 6 находим значение коэффициента диффузии для протонов больших энергий (3—4 Бэв), которое почти в пять раз больше по сравнению с D_1 . Длина свободного пробега для протонов больших энергий $l \approx 2,7 \cdot 10^{12}$ см. Соответственно значение напряженности магнитного поля облаков для случаев больших энергий $H_2 > > P_2/300l_2 = 6,2 \cdot 10^{-6}$ гс ($P_2 = 5 \cdot 10^9$ эв/с).

Сравнивая величины коэффициентов диффузии D_1 и D_2 для импульсов $p_1 = 5 \cdot 10^8$ эв/с и $p_2 = 5 \cdot 10^9$ эв/с, можно зависимость l от импульса протонов p аппроксимировать следующим образом: $l = l_0 p^k$,

и соответственно $D(p) = vl_0 p^k/3$, где v — скорость частицы, l_0 — постоянная, а $k \approx \frac{1}{2}$.

Как видно из рис. 7, две экспериментальные точки для начала вспышки сильно выпадают из данных расчетной кривой для $t_0 = 0$ и лучше согласуются с кривой для $t_0 = 0,3$. Но нельзя, однако, из этого сделать заключение, что генерация космических лучей запоздала по сравнению с началом хромосферной вспышки. Такой вывод трудно сделать, так как расчетные кривые недостаточно точны. Эта неточность связана главным образом с предположением о постоянстве коэффициента диффузии в пространстве. В действительности же вполне возможно, что значение коэффициента диффузии больше среднего в пространстве ближе к Солнцу и меньше за орбитой Земли. Поэтому можно качественно понять, почему данные эксперимента для начала развития вспышки лежат ниже расчетной кривой для $t_0 = 0$. Если предположить, что для начального участка кривой эффективный коэффициент диффузии больше среднего на 30—40%, то мы могли бы описать данные эксперимента и для $t = 0$.

Поэтому можно сказать, что если 4 мая и было запаздывание генерации космических лучей малых энергий по сравнению с началом хромосферной вспышки, оно было менее 20 мин.

Для больших значений t , как видно на рис. 7, данные эксперимента лежат ниже расчетной кривой. Такой результат также можно объяснить, исходя из предположения, что значение D для пространства за орбитой Земли несколько меньше среднего.

§ 9. О вспышках космических лучей, генерированных на обратной стороне солнечного диска. Радиальные магнитные поля Солнца

Ясно, что хромосферные вспышки, в процессе которых генерируются космические лучи, одинаково часто происходят как на видимой, так и на обратной стороне Солнца. Изучение случаев генерации космических лучей на обратной стороне Солнца представляет интерес и позволит получить дополнительные сведения о структуре электромагнитных полей в межпланетном пространстве.

Будем исходить из данных эксперимента о том, что распространение протонов Солнца в межпланетном пространстве носит диффузный характер. По истечении 1—2 час после генерации космических лучей на Солнце излучение в пространстве будет изотропно и условия для регистрации у Земли протонов космических лучей, генерированных на прямой и обратной сторонах Солнца, будут близкими. Следовательно, в стратосфере должны регистрироваться так же часто и случаи вспышек космических лучей, которые обязаны возникновением хромосферных вспышек, происходящих на обратной стороне Солнца.

Если в межпланетном пространстве, помимо магнитных неоднородностей, на которых происходит рассеяние протонов, имеется еще и радиальное магнитное поле Солнца, то диффузное распространение протонов от Солнца в межпланетной среде будет носить анизотропный характер. Поэтому вспышки космических лучей, происходящие на обратной стороне Солнца, если и будут регистрироваться у Земли, то с амплитудами меньшими, чем вспышки, происходящие на его видимой стороне. Такое представление о явлении оправдывается данными эксперимента²⁸.

Известно, что многие случаи вспышек космических лучей в стратосфере сопровождаются геофизическими и радиоастрономическими явле-

ниями: магнитными бурями, ионосферными возмущениями, полярными сияниями, форбуш-сподами, поглощением космического радиоизлучения в полярной шапке и др. Магнитные бури, северные сияния, форбуш-споды связаны с приходом к Земле корпускулярных потоков, выбрасываемых Солнцем во время хромосферных вспышек. Направление движения корпускулярных потоков Солнца почти радиальное ²⁹, поэтому к Земле приходят корпускулярные потоки лишь от тех хромосферных вспышек, которые происходят на видимой стороне солнечного диска. Таким образом, те вспышки космических лучей в стратосфере, которые сопровождаются форбуш-сподом, магнитными бурями и полярными сияниями, можно отнести за счет хромосферных вспышек, происходящих на видимой стороне солнечного диска. Известно также, что хромосферные вспышки, дающие вспышку космических лучей, в большинстве случаев сопровождаются радиоизлучением IV типа ^{9, 30}. Поэтому вспышки космических лучей, сопровождаемые радиоизлучением IV типа, также с большим основанием можно отнести за счет хромосферных вспышек на видимой стороне солнечного диска.

Отобранные по указанным признакам случаи вспышек космических лучей (по данным мировой печати до начала 1962 г.) приведены в первой части табл. II, где указаны дата вспышки и максимальные измеренные интенсивности первичных протонов в единицах нормальной интенсивности галактических космических лучей *m*. С достаточным основанием можно полагать, что приведенные в табл. II 17 вспышек космических

Таблица II

Дата	Зарегистрировано максимальное увеличение	Дата	Зарегистрировано максимальное увеличение	Дата	Зарегистрировано максимальное увеличение
17.III 1958 г.	35	1.IV 1960 г.	4	3.III 1958 г.	2500
26.III 1958 г.	15	4.V 1960 г.	35	3.X 1958 г.	2
8.VII 1958 г.	40	3.IX 1960 г.	70	9.VII 1959 г.	2
22.VIII 1958 г.	10	12.XI 1960 г.	70	28.IV 1960 г.	7
26.VIII 1958 г.	2	15.XI 1960 г.	500	29.IV 1960 г.	2
11.V 1959 г.	40	12.VII 1961 г.	10	12.V 1960 г.	3
10.VII 1959 г.	200	19.VII 1961 г.	140	13.V 1960 г.	5
15.VII 1959 г.	800	20.VII 1961 г.	10	21.XI 1960 г.	7
17.VII 1959 г.	2800			13.V 1960 г.	5

лучей обусловлены хромосферными вспышками, происходящими на видимой стороне солнечного диска.

В третьей колонке таблицы приведены вспышки, которые нельзя с полной определенностью отнести за счет хромосферных вспышек на видимой стороне диска, хотя некоторым из них и предшествовали хромосферные вспышки. Так, вспышке 3 марта 1958 г. предшествовала хромосферная вспышка 1.III в 9 час 12 мин балла 3. Сведений о всплеске радиоизлучения IV типа нет. Известно, однако, что с 3.III, 6 час, по 8.III, 18 час, наблюдались сильные геомагнитные возмущения, а в ночь с 3 на 4.III в Мурманске наблюдалось полярное сияние. Поэтому не исключена возможность, что эта вспышка также была вызвана хромосферной вспышкой на видимой стороне Солнца. Лишь для трех случаев (3.X 1958 г., 21.XI 1960 г., 9.V 1961 г.) не были найдены соответствующие хромосферные вспышки.

Следовательно, из 26 вспышек 17 заведомо обусловлены хромосферными вспышками на видимой стороне, а из остальных девяти по крайней.

мере шесть также могли быть вызваны хромосферными вспышками на видимой стороне солнечного диска.

Обращают на себя внимание величины амплитуд вспышек космических лучей, попавших в первую и вторую части таблицы. За исключением случая 3 марта, амплитуды вспышек во второй части таблицы существенно (примерно на два порядка) меньше, чем в первой.

Таким образом, можно думать, что в стратосфере были зарегистрированы и вспышки космических лучей, генерированных на обратной стороне солнечного диска, но с амплитудами, существенно меньшими. Такой результат свидетельствует о преимущественном направлении движения протонов с той стороны Солнца, на которой были генерированы космические лучи. Вывод этот, однако, не будет противоречить представлениям о диффузном распространении космических лучей Солнца, если предположить, что в межпланетном пространстве, помимо магнитных неоднородностей, имеются также радиальные магнитные поля Солнца. Если напряженности радиальных магнитных полей и полей неоднородностей не сильно различаются между собою, то можно ожидать анизотропно диффузное распространение протонов с той стороны Солнца, на которой была вспышка космических лучей. Такая интерпретация результатов хорошо согласуется с представлениями, высказанными Паркером³¹ о так называемом солнечном ветре, идущим от Солнца и несущим, по-видимому, магнитные поля с преимущественными радиальными направлениями. Как уже отмечалось, в литературе обсуждаются данные о магнитных полях в виде петель, радиально вытягиваемых от Солнца во время хромосферных вспышек. Существование таких магнитных полей, по Мак-Кракену²³, следует из данных о направлениях прихода космических лучей Солнца на Землю, о распределении вспышек космических лучей по солнечному диску. Но вытекающий из наших данных вывод о радиальном магнитном поле не связан с какой-либо отдельной хромосферной вспышкой. Эти поля скорее всего носят стационарный характер. С этой точки зрения изложенный результат более гармонирует с выводом, впервые сделанным Виткевичем, о существовании радиальных магнитных полей Солнца и основанном на радиоастрономических данных о распределении электронных неоднородностей в пространстве сверхкороны Солнца³².

II. 27-ДНЕВНЫЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СТРАТОСФЕРЕ

Систематические измерения на шарах-зондах позволили выявить 27-дневные вариации интенсивности космических лучей в стратосфере^{33, 34}. Эти вариации в общем не устойчивы. Четко они были обнаружены в период с июля 1957 г. по февраль 1958 г.

Методом скользящих средних были получены кривые векового хода вариаций. Отклонения результатов каждого измерения от векового хода вариации обрабатывались методом периодограмм³⁵. Результаты этих обработок изображены на рис. 8, где по оси абсцисс отложены заранее заданные значения периода вариации T в днях, по ординате — получающиеся амплитуды. Из рис. 8 видно, что как по данным в стратосфере (кривая 1), так и по наземным данным нейтронного монитора (кривая 2) (Херстмосе, Англия, геомагнитная широта $53,5^\circ$ N), в периодограммах выявляется резко выраженный максимум отклонений. Этот максимум приходится на период в 27—29 дней. Прямые на рисунке показывают средний уровень амплитуд, получаемых после перемешивания последовательности экспериментальных данных на случайные³⁵. Таким образом, в этот период в стратосфере наблюдалась 27-дневная вариация космиче-

ских лучей, амплитуда которой составляла $5,5 \pm 0,6\%$. На уровне моря амплитуда 27-дневной волны по данным нейтронного монитора составляет $2 \pm 0,2\%$, по данным ионизационной камеры $0,7 \pm 0,4\%$.

Для изучения корреляции 27-дневных вариаций с геомагнитными данными тем же методом периодограмм были обработаны и данные по мировому K -индексу. Пунктирная кривая на рис. 8 есть периодограмма для K -индекса. Получившийся максимум при $T = 23$ суток находится вне пределов ошибок. Такой же вид имеет периодограмма для K -индекса по данным измерений Москвы и Ташкента. Интересно отметить, что получающееся значение $T \approx 23$ суток для K -индекса, по-видимому, не является случайным, так как максимум в периодограммах для

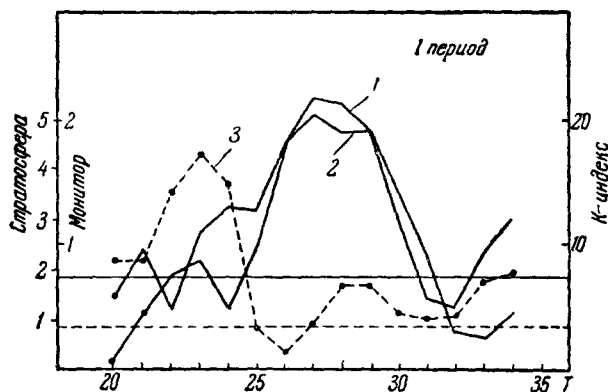


Рис. 8. Периодограммы, полученные по данным измерений в стратосфере на широте 51° (1), по данным нейтронного монитора ($\lambda = 53^\circ$) (2) и для K -индекса (3).

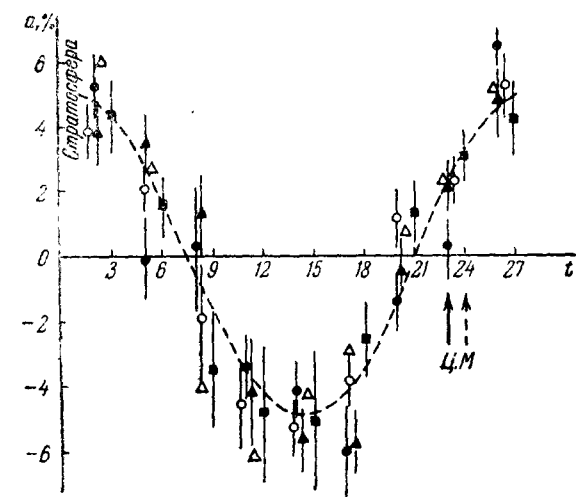


Рис. 9. Форма волны 27-дневных вариаций в первом периоде измерений.

● — Для стратосферы, $\lambda = 51^\circ$; ▲ — по данным нейтронного монитора, $\lambda = 53^\circ$; ■ — по данным АСК, $\lambda = 51^\circ$; ○ — по данным нейтронного монитора, $\lambda = 26^\circ$; △ — по данным нейтронного монитора, $\lambda = 0^\circ$. Моменты прохождения активных областей через центральный меридиан.

ны в соответствии с отношением их амплитуд вариации к амплитуде вариации в стратосфере.

Во-первых, видно, что с точностью до 1—2 дней фазы волн, получаемых для различных компонент вариации, совпадают между собой. Во-вторых, форма волны очень близка к синусоиде. Пунктирная кривая на рисунке — синусоида.

К-индекса, полученных при обработке для других периодов измерений, с 1 февраля по 1 июля 1958 г. и с 1 января по 1 июля 1959 г., также лежат в пределах 22—25 суток.

Таким образом, нужно признать, что в рассматриваемый период измерений корреляции между 27-дневными вариациями космических лучей и K -индекса не было.

Остановимся на вопросе о форме волны 27-дневной вариации космических лучей, построенной для $T = 27$ суток на рис. 9. По оси абсцисс отложено время в сутках, а по оси ординат — соответствующие значения отклонений. Данные для нейтронного монитора и АСК приведены

Рассмотрен вопрос о корреляции 27-дневной вариации в космических лучах с солнечными данными. Были сделаны попытки найти корреляцию с данными относительного числа солнечных пятен, но определенной корреляции не обнаружено. С другой стороны, казалось ясным, что 27-дневная волна вариации космических лучей обязана, по-видимому, вращению Солнца вокруг своей оси. Долгоживущие образования на Солнце, флоккулы, могли быть причиной 27-дневной модуляции интенсивности космических лучей.

В рассматриваемый период на Солнце были две активные области, которые существовали в течение семи оборотов Солнца (согласно данным, опубликованным в бюллетенях «Солнечные данные», 1957 г., № 4—6). Одна из них (широта $20-23^\circ$ и коррингтовская долгота $149-165^\circ$) первый раз прошла через центральный меридиан 19 июля (номер группы 315) и последний 27 декабря 1957 г. (номер группы 622). Обе области в течение всего времени их существования были окружены флоккулами мощностью 3.

Время прохождения этих групп через центральный меридиан отмечено стрелками на рис. 9. Хотя полной уверенности в том, что наблюдаемые 27-дневные вариации космических лучей действительно обязаны указанным активным областям (флоккулам), но кажется правдоподобным, что обсуждаемая 27-дневная модуляция была вызвана корпускулярными потоками, исходящими из этих активных областей на Солнце.

Время запаздывания минимума интенсивности космических лучей по отношению времени прохождения активных областей через центральный меридиан, как это видно на рис. 2, равно ~ 20 дням. Это время запаздывания соответствует скорости распространения корпускулярных потоков $\sim 10^7$ см/сек. То обстоятельство, что форма обсуждаемой 27-дневной волны не остроконечна и близка к синусоиде, свидетельствует о широком угловом растворе выхода корпускулярных потоков у Солнца.

III. ПОНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СТРАТОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

До последнего времени изучение эффектов понижения интенсивности космических лучей во время геомагнитных бурь, так называемое явление форбуш-понижения (Ф.-П), проводилось почти исключительно при помощи наземной аппаратуры непрерывной регистрации космических лучей. Из-за толщи атмосферы информация, получаемая при помощи наземной аппаратуры, позволяет изучить лишь те вариации, которые вызываются первичной компонентой космических лучей с энергиями, большими чем $4-5$ Бэв.

Для широкого интервала спектра первичных космических лучей с меньшими энергиями эффекты форбуш-понижения не были изучены.

Исследования на больших высотах атмосферы и за ее пределами позволяют получить данные об эффектах при Ф.-П для первичной компоненты с существенно меньшими энергиями.

За последнее время данные о форбуш-понижениях поступают по измерениям, проводимым при помощи искусственных спутников Земли, космических ракет^{36, 37} за пределами атмосферы, и по измерениям в стратосфере.

В период с июля 1957 по 1962 г. в стратосфере было зарегистрировано 35 случаев спада интенсивности космических лучей с амплитудами более 5%, коррелированных с геомагнитными бурями. Ниже приводятся результаты измерений для наиболее ярко выраженных эффектов Ф.-П в стратосфере.

§ 1. Результаты измерений

Обсуждаемые результаты получены в измерениях при помощи радиозондов РК-1 в максимуме интенсивности космических лучей на геомагнитных широтах 51 и 41°. Данные на широте 64° не рассматриваются, так как при Ф.-П в стратосфере на широтах 51 и 41° и на широте 64° в большинстве случаев наблюдались вспышки космических лучей.

Характерные данные о Ф.-П в стратосфере, полученные в период мая — августа 1959 г., приведены на рис. 10. По оси ординат отложены

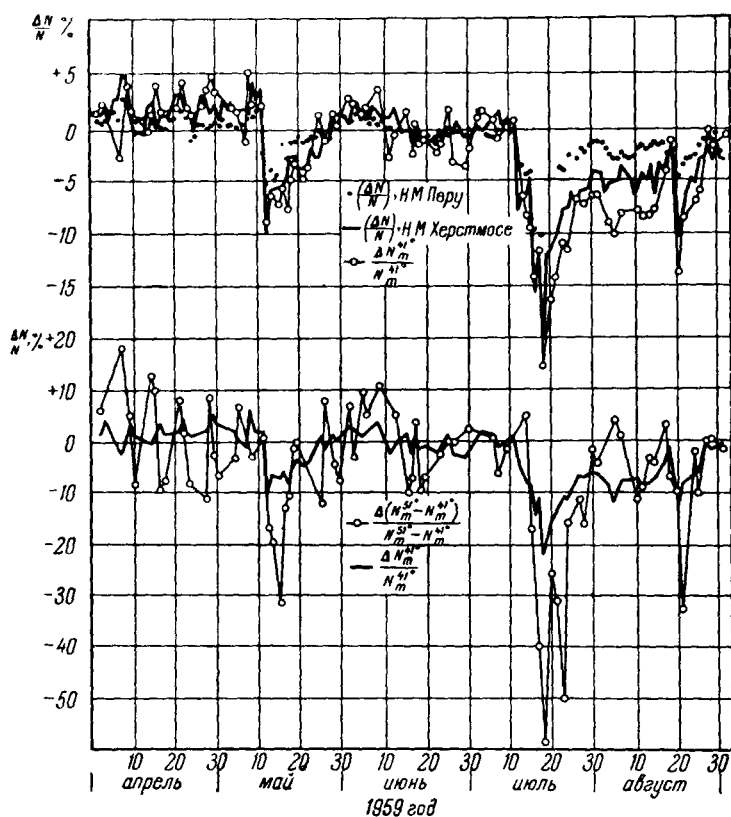


Рис. 10. Относительные изменения интенсивности космических лучей.

отклонения интенсивности космических лучей в процентах от среднемесячного значения за июнь 1959 г. Кружки на верхней части рисунка соответствуют данным измерений в стратосфере в Симеизе. Для сравнения приведены также данные нейтронного монитора (н. м.) Уанкайо (Перу, $\lambda = 0,6^\circ$) (точки) и в Херстмосе, Англия, $\lambda = 53^\circ$ N (сплошная линия). Для стратосферы продолжительность измерений составляет примерно 10 мин. Для наземных станций 2-часовые значения взяты для времени, которое близко к времени измерений в стратосфере.

Из данных на рис. 10 отчетливо видны случаи резкого спада интенсивности космических лучей в мае и июле 1959 г. Мы также видим очень хорошее согласие результатов, получаемых в стратосфере на широте 41° и наземных измерений (н. м. в Херстмосе). Получаемые в стратосфере на

Таблица III

Относительное уменьшение интенсивности космических лучей (%) *)

Дата	Нейтр. монитор	Стратосфера		Дата	Нейтр. монитор	Стратосфера	
		$\lambda=51^{\circ}$	$\lambda=41^{\circ}$			$\lambda=51^{\circ}$	$\lambda=41^{\circ}$
Сентябрь 1957 г.				Август 1959 г.			
2.IX	6,6	9,5		20.VIII	10,2	12,6	13,4
5.IX	9,0	10		21.VIII	7,9	14,0	8,1
6.IX	7,5	9,8		22.VIII	5,6	4,1	
7.IX	8,5	8,7		24.VIII	4,9	5,7	6,6
9.IX	4,7	15,3		25.VIII	2,7	6,8	5,6
12.IX	4,7	9,8		Июль 1959 г.			
14.IX	4,7	10,1		13.VII	6,0		6,2
Март 1958 г.				14.VII	6,1	5,2	8,2
27.III	7,5	10,8		15.VII	4,9	12,7	9,4
28.III	7,5	4,0		16.VII	15,7		14
31.III	5,5	5,8		17.VII	12,3	18,4	11,5
Апрель 1958 г.				18.VII	20,3	31,3	22,6
1.IV	5,0	3,9		19.VII	12,5	17,3	16,1
2.IV	3,6	7,0		20.VII	11,3	18,7	14,0
5.IV	5,0	5,1		21.VII	10,3	18,1	
6.IV	5,0	7,8		22.VII	9,4	15,8	10,7
7.IV	2,6	6,2		23.VII	7,6	20,3	
Август 1958 г.				24.VII	7,4	12,5	11,3
19.VIII	3,4	5,3		25.VII	6,0	12,8	
20.VIII	1,9	4,8		Апрель 1960 г.			
23.VIII	2,8	7,2		1.IV	8,2	8,7	9,7
25.VIII	8,0	8,6	8,8	4.IV	6,3	6,2	6,0
26.VIII	5,2	3,5	2,0	5.IV	3,2	5,6	4,0
27.VIII	5,7	9,1		Ноябрь 1960 г.			
28.VIII	6,6	7,5	6,5	14.XI	7,4		5,5
29.VIII	5,2	4,7		16.XI	7,8	14,4	9,6
30.VIII	4,5	4,9		17.XI	4,7	12,9	5,9
Февраль 1959 г.				18.XI	5,6	18,6	6,5
12.II	5,2	7,0	10,7	19.XI	4,6	7,9	5,5
13.II	5,1	9,7	8,5	20.XI	4,1	5,6	10,7
14.II	4,3	10,2	6,9	22.XI	3,8	5,3	4,9
16.II	5,1	13,7	4,4	23.XI	4,4		4,8
17.II	5,1	14,7	6,9	24.XI	3,8	8,7	6,3
18.II	4,7	7,7	3,9	Июль 1961 г.			
19.II	4,1	11,2	5,9	14.VII	6,7	10,9	9,5
20.II	4,1	7,6	5,7	17.VII	3,4	2,7	5,4
21.II	3,5	9,3		20.VII	5,5	6,7	6,5
23.II	3,2	4,5	3,1	21.VII	7,1	6,3	
Май 1959 г.				24.VII	5,1	6,8	4,2
12.V	10,0	10,9	9,0	27.VII	10,2	12,2	6,9
13.V	4,0	8,6	5,0	28.VII	7,8	8,8	12,5
14.V	5,7	9,1		31.VII	3,1	8,5	7,2
15.V	5,6	12,9	7,1	Август 1961 г.			
16.V	5,7	7,5	5,8	1.VIII	4,4	3,2	5,7
17.V	4,8	8,5	7,8				
18.V	2,9	3,9	4,7				

*) Для приведенных в таблице бурь за 100% принималась интенсивность, полученная в измерениях в следующие дни.
Сентябрь 1957 г.—29.VIII 1957 г.
Март 1958 г.—25.III 1958 г.
Август 1958 г.—16.VIII 1958 г.
Февраль 1959 г.—10.II 1959 г.
Май 1959 г.—среднемесячные значения за июнь 1959 г.
Июль 1959 г.—» » »
Август 1959 г.—» » »
Апрель 1960 г.—» март 1959 г.
Ноябрь 1960 г.—» октябрь 1960 г.
Июль 1961 г.—» июнь 1961 г.

широте 41° и у Земли данные близки друг к другу. Такой результат можно интерпретировать таким образом, что для этих двух родов измерений пороговые энергии первичных космических лучей оказались близкими между собою. Таким образом, полученные данные о вариациях в стратосфере на широте 41° (в %) более или менее эквивалентны результатам наземных измерений нейтронного монитора. Поэтому данные о вариациях первичных космических лучей с меньшими энергиями получим, пользуясь результатами на широте 51° , где критическая энергия для первичных протонов равна $1,5 \text{ Бэв}$.

Изучая вариации для разности чисел частиц $N_m^{51} - N_m^{41}$ (получаемой после вычитания из данных измерений на широте 51° данных на широте 41°), мы тем самым изучим вариации, обязанные первичным космическим лучам с энергиями, лежащими в интервале от $1,5$ до $4,6 \text{ Бэв}$.

На рис. 10 внизу кружками изображены данные о вариациях для разности $N_m^{51} - N_m^{41}$ в процентах. Сплошная линия дана для широты 41° . Видно, что флуктуации разности значительны. Они происходят не только в периоды Ф.-П, но и в обычные периоды. Природа этих больших флуктуаций пока не ясна. Но их нельзя, однако, целиком отнести за счет статистических ошибок измерений. Из рис. 10 видно, что отклонения для разности почти в три раза больше, чем для N_m^{41} , и что интенсивность первичных космических лучей в интервале энергий от $1,5$ до $4,6 \text{ Бэв}$ во время Ф.-П в мае 1959 г. упала ниже нормальной примерно на 30%, а в июле почти на 60%.

Сводка данных для ряда случаев Ф.-П в стратосфере, полученных в измерениях над Москвой и Симеизом, приведена в табл. III. Там же приведены данные, соответствующие наземным измерениям — нейтронным мониторам на станциях в Дип-Ривере или в Херстмосе ^{38, 39}. Отметим, что приведенные данные в стратосфере находятся в согласии с данными американских авторов. Винклер в опытах над Миннеаполисом 26 марта 1958 г. нашел спад интенсивности космических лучей на 23% (при давлениях 10 Г/см^2) ⁴⁰; Макдональд и Вебер 16 мая 1959 г. нашли спад числа частиц на 24% (при давлениях 6 Г/см^2) для протонов и α -частиц с жесткостями, большими $1,1 \text{ Бэв/с}$ ⁴¹. Симпсон в опытах на спутнике «Эксплорер VI» нашел понижение на 15% интенсивности космических лучей ³⁶ и на 28% в опытах на космической ракете «Пионер V» 1 апреля 1960 г. ³⁷.

§ 2. Обсуждение результатов

Пользуясь совокупностью результатов измерений Ф.-П для каждого случая, находим величины

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i^{51} / \delta_i^{41}}{n} \quad \text{и} \quad x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i^{51} / \delta_i^{\text{н.т}}}{n},$$

характеризующие жесткость спектра вариации. Здесь δ_i^{51} , δ_i^{41} — величины спадов интенсивности космических лучей в максимуме в индивидуальном измерении на широтах 51 и 41° (в %), n — число измерений в стратосфере, $\delta_i^{\text{н.т}}$ — спады, получаемые в наземных измерениях с помощью нейтронного монитора. Величины η и x приведены в табл. IV. Ошибки — среднеквадратичные отклонения индивидуальных измерений от среднего по всем измерениям. Как видно из этой таблицы, за исключением случаев в феврале 1959 г. и ноябре 1960 г., значения η и x в пределах ошибок не меняются от бури к буре. Этот результат согласуется с данными наземных измерений ^{42, 43}.

Одной из физических характеристик при форбуш-понижениях является вид энергетического спектра вариации $\Delta D/D$, где ΔD — дифференциальный спектр первичной компоненты, претерпевшей вариацию; D — первичный спектр до вариации. В зависимости от той или иной теоретической модели о модуляционных эффектах космических лучей, вызываемых магнитными и электрическими полями, несомыми плазменными

потоками Солнца в межпланетном пространстве, виды спектров вариации $\Delta D/D$ будут различны.

Согласно многочисленным результатам наземных измерений для первичных частиц с энергиями примерно больше 7 Бэв спектр $\Delta D/D \approx A/\varepsilon$, где ε — полная энергия первичных протонов^{42, 44}. Пользуясь приведенными данными для стратосферы, можно получить сведения о спектре вариаций и в области меньших энергий, до энергии 2,5 Бэв. Метод коэффициентов связи, разработанный Л. И. Дор-

маном²⁵, позволяет найти связь между измеряемыми вариациями космического излучения в стратосфере и вариациями в первичном энергетическом спектре. Используя этот метод и данные о коэффициентах связи для максимума глобальной интенсивности, приведенные в работе⁴⁵, был получен энергетический спектр вариаций. Для энергетического спектра вариаций $\Delta D/D$ вида A/ε^α стратосферные экспериментальные данные приводят к тому, что $\alpha = 0,6 \pm 0,1$.

IV. ВЕКОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Хорошо известно, что интенсивность космических лучей испытывает вековые изменения, связанные с 11-летним циклом солнечной активности⁴⁶. В период высокой активности Солнца интенсивность космических лучей падает, а в период минимума увеличивается. Амплитуда изменений в μ -мезонной компоненте на уровне моря составляет приблизительно 5%, в нуклонной компоненте — 20%. Вариации нуклонной компоненты на Земле обусловлены модуляцией первичного космического излучения в области их энергий, в основном больших 5 Бэв. Вариации μ -мезонной компоненты вызываются первичной компонентой значительно больших энергий. Данные о вариациях интенсивности первичного излучения с энергиями частиц, меньшими 5 Бэв, можно получить посредством измерений в стратосфере. Интенсивность космических лучей на больших высотах в стратосфере на высоких широтах в период максимума солнечной активности примерно в два раза меньше, чем в период минимума³⁴. Изложенные ниже результаты основаны на большом числе измерений. Они позволили впервые получить непрерывные данные о вековом ходе интенсивности космических лучей в стратосфере одновременно на различных широтах. Обработке подверглись результаты более трех тысяч измерений, выполненных при помощи одиночного газоразрядного счетчика, входящего в состав радиозонда РК-1.

Таблица IV

Форбуш-понижения	λ	η
Сентябрь 1957 г.	$1,8 \pm 0,3$	
Март 1958 г.	$1,5 \pm 0,2$	
Август 1958 г.	$1,5 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$
Февраль 1959 г.	$2,2 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,2$
Май 1959 г.	$1,6 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$
Июль 1959 г.	$1,8 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,1$
Август 1959 г.	$1,5 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,2$
Апрель 1960 г.	$1,3 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,2$
Ноябрь 1960 г.	$2,1 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,3$
Июль 1961 г.	$1,3 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,2$
Среднее . . .	$1,66 \pm 0,08$	$1,33 \pm 0,08$

Для того чтобы повысить точность измерений и исключить возможные ошибки в определении высоты с помощью барографа, в дальнейшем использовались данные о числе частиц в максимуме высотной кривой. На широтах 64, 51 и 41° эти максимумы были расположены на глубинах около 50, 60 и 70 Г/см² давления соответственно.

В обработку не вошли результаты, которые были получены во время всплеск интенсивности космических лучей в стратосфере, а также те, которые были искажены излучениями радиоактивных облаков от атомных взрывов в атмосфере. На рис. 11 изображены среднемесячные значения максимума интенсивности космических лучей на трех широтах. По оси ординат отложено число частиц в сек⁻¹см⁻², по оси абсцисс — время.

Точки на рис. 11 соответствуют средним значениям измерений за более чем десять полетов в месяц (в 1957—1958 гг.), а с 1959 г. — за пятнадцать полетов и больше. Такая частота измерений при продолжительности наблюдения в области максимума около 8 мин дает статистическую ошибку измерений около 0,25%. В результате каждого измерения внесены поправки, учитывающие различие в эффективности счетчиков³³.

Из данных, приведенных на рис. 11, видно, что имеется много нерегулярных флуктуаций интенсивности космических лучей, в большинстве случаев коррелирующих на разных широтах. Корреляция данных особенно высока для широт 51 и 64°. На широте 41° вековой ход интенсивности космических лучей, за исключением результатов, относящихся ко второй половине 1958 г., хорошо коррелирует с данными наземных измерений нейтронного монитора (Дип-Ривер)³⁸. Некоторые флуктуации вызваны магнитными бурями и сопровождающими их форбуш-спадом в стратосфере. Таковы, например, данные за сентябрь 1957 г., март—апрель и июль 1958 г., май и июль 1959 г., апрель и ноябрь 1960 г., июль 1961 г. и другие.

Однако на фоне нерегулярных флуктуаций видно общее увеличение интенсивности космических лучей. Оно тем больше, чем выше широта места наблюдения. Интенсивность космических лучей в конце 1961 г. на широте 64° увеличилась по сравнению с 1957 г. приблизительно на 40% и на 25% на широте 51°.

Для широты 41° это увеличение по сравнению с 1958 г. составило менее 10%. Отсюда следует, что рост интенсивности космических лучей в стратосфере происходит преимущественно за счет первичных частиц с энергиями, меньшими 4,6 Бэв.

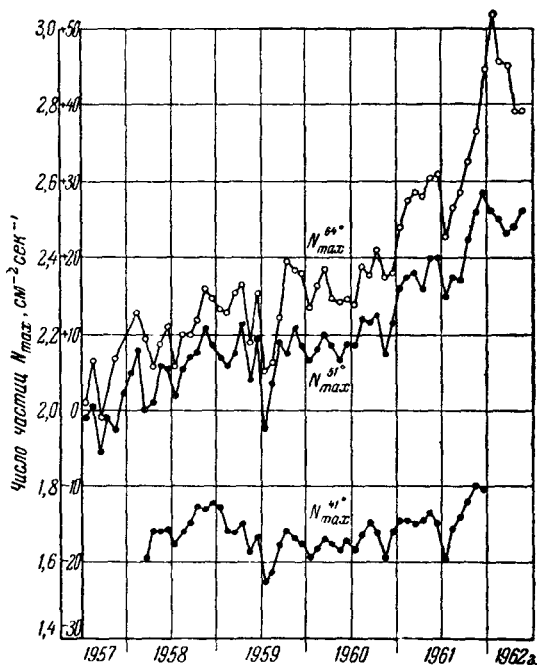


Рис. 11. Среднемесячные значения интенсивности космических лучей в стратосфере за время с июля 1957 г. по июль 1962 г.

Как видно из рис. 11, возрастание числа частиц со временем на широтах 51° и 64° не происходит непрерывно. В период с июля 1957 г., в течение примерно двух лет, т. е. до конца 1960 г., оно оставалось почти постоянной. Но в январе—феврале 1961 г. происходит резкое возрастание уровня интенсивности космических лучей, а в ноябре того же года этот уровень вновь резко повышается. Таким образом, вековые изменения интенсивности космических лучей в стратосфере в рассматриваемый период носят ступенчатый, скачкообразный характер. Ниже рассмотрим, как это коррелирует с изменением активности Солнца.

§ 1. Вековые изменения для разности чисел частиц

На рис. 12 представлены разности чисел частиц $\Delta N_m^{64-41^\circ}$ и $\Delta N_m^{51-41^\circ}$, полученные в результате вычитания из измеренного числа частиц на широтах 64° и 51° числа частиц для широты 41° . Эти разности даны для

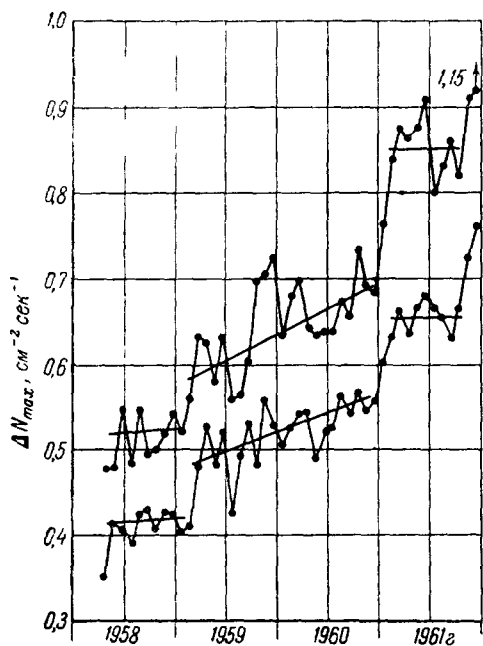


Рис. 12. Разности средних месячных значений интенсивности космических лучей.

совпадающих по времени полетов на соответствующих широтах (около 80% общего числа полетов). Вековые ходы для разности числа частиц обусловлены вековыми ходами интенсивности первичных космических лучей с энергиями частиц от 0,1 до 4,6 и от 1,3 до 4,6 Бэв. Отметим, что около 70% числа первичных частиц имеют энергии меньше 4,6 Бэв.

Как видно из рис. 12, ступенчатый вид вековых ходов характерен и для разности чисел частиц.

Из данных рис. 12 получается, что $\Delta N_m^{51-41^\circ}$ в декабре 1961 г. увеличилась по сравнению с 1958 г. приблизительно на 80%, а $\Delta N_m^{64-41^\circ}$ — почти на 100%. В то же время увеличение для полного числа частиц, регистрируемых на широте 51° , за тот же интервал времени составляет всего 20%. Естественно, что рост в интенсивности первичной компоненты за рассматриваемый период еще больше.

§ 2. Корреляция с активностью Солнца

Вспышки космических лучей Солнца и понижения интенсивности космических лучей во время магнитных бурь коррелируют с хромосферными вспышками на Солнце, а вековой ход — с 11-летним циклом солнечной активности.

На рис. 13 по ординате отложены средние месячные значения максимума числа частиц на широте 51° (сплошные точки, шкала слева) и средние месячные значения числа солнечных пятен R (крестики, шкала справа — логарифмический масштаб). Прямоугольниками вдоль оси абсцисс изображены данные о форбуш-спадах, имевших амплитуду более 3% и продолжавшихся более трех дней (нейтронный монитор в Дип-Ривере).

На рис. 13 нетрудно заметить, что имеется отчетливо выраженная корреляция между изменением интенсивности космических лучей и изменением числа солнечных пятен. За исключением периода с июля 1957 г. и до середины 1958 г., о котором будет сказано ниже, вековой ход изменения числа солнечных пятен и интенсивности космических лучей почти одинаковы. Ступенчатый характер роста интенсивности космических лучей в 1961 г., о чем говорилось выше, оказывается характерным и для числа солнечных пятен. Ступеньки в вековом ходе для R приходятся приблизительно на то же время, что и для космических лучей. Отметим

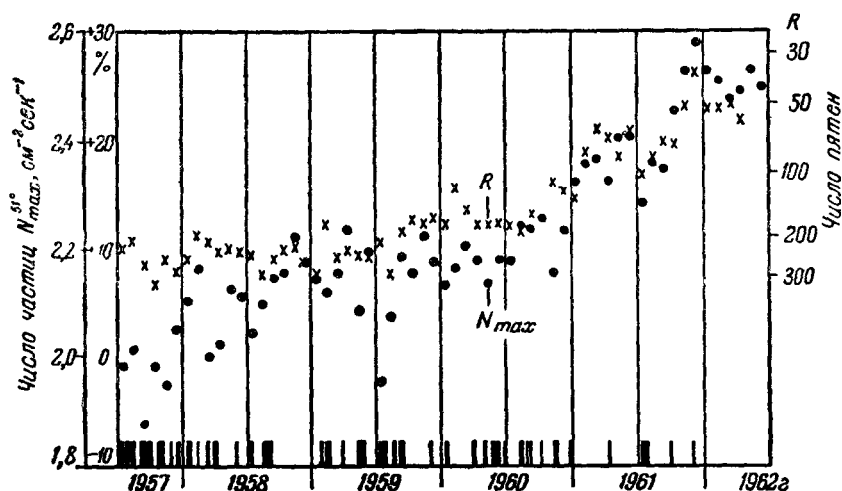


Рис. 13. ● — Среднемесячные значения интенсивности космических лучей на широте 51° ; × — среднемесячные данные о числе солнечных пятен; ■ — форбуш-спады по данным нейтронного монитора.

также, что запаздывание в изменениях интенсивности космических лучей относительно изменений числа R — меньше месяца.

Интересно отметить, что интенсивность космических лучей логарифмически зависит от числа солнечных пятен, т. е. изменение числа солнечных пятен R тем сильнее сказывается на интенсивности космических лучей, чем меньше само R .

Остановимся на данных, относящихся к периоду с июля 1957 г. до середины 1958 г. (см. рис. 13). В этом интервале времени корреляция между числом пятен и интенсивностью космических лучей нарушается. Но, как видно из данных на рисунке, этот период характеризуется довольно частыми случаями форбуш-понижений. В ряде случаев несколько отдельных форбуш-понижений накладывались друг на друга. Эти частые понижения и являются, вероятно, основной причиной нарушения корреляции между интенсивностью космических лучей и числом солнечных пятен, которая отчетливо видна после середины 1958 г.

§ 3. Характер изменения энергетического спектра первичных частиц с циклом солнечной активности

Информацию по этому вопросу можно получить из высотных зависимостей числа частиц в верхних слоях атмосферы. Так как основное увеличение числа частиц в стратосфере в период спада активности Солнца происходит за счет первичных частиц малых энергий, целесообразно

изучить высотные зависимости дифференциально, исключив из данных измерений то число частиц, которое обязано первичным частицам больших энергий. Две серии высотных зависимостей, относящихся к различным периодам измерений, приведены на рис. 14. Эти кривые получены путем вычитания из результатов измерений на широте 64° данных на широте 41° (кривые I—4) и данных на широте 51° (кривые I—III). По оси ординат отложено число частиц $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$. По абсциссе—давление $\Gamma/\text{см}^2$. Процедура

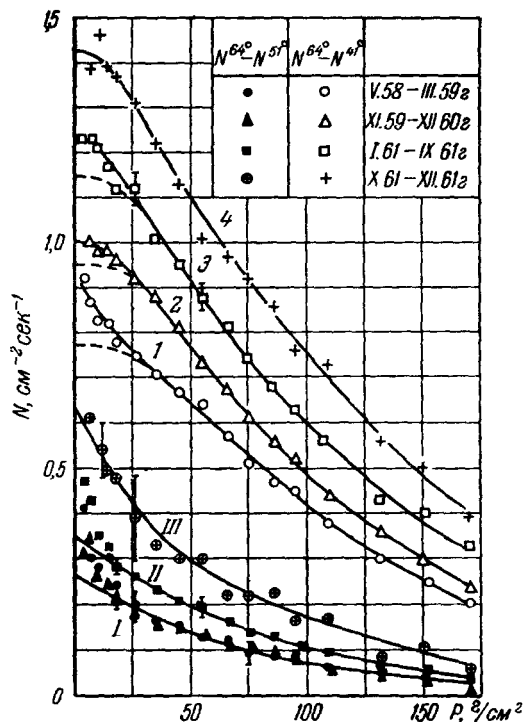


Рис. 14. Высотный ход интенсивности космических лучей в стратосфере.

I, II, III — для разности чисел частиц Мурманск — Москва, 1, 2, 3, 4 — для разности чисел частиц Мурманск — Сименз

нечной активности, не сильно отличается от первоначального спектра и что колено высокоширотного обрезания не сдвигается существенно в ту или иную сторону с циклом солнечной активности.

Для получения данных об абсолютной интенсивности первичных космических лучей вблизи границы атмосферы была проведена следующая процедура обработки. Кривые I—III на рис. 14, проведенные по точкам, есть экспоненциальные зависимости e^{x/λ_0} , где x — давление, $x_0 = 80 \Gamma/\text{см}^2$. Пересечение этих кривых с осью ординат дает значение потока частиц с энергиями от 0,1 до 1,5 Бэв на границе атмосферы, без заметной примеси солнечной компоненты космических лучей. Интенсивности этой компоненты соответствуют разностям ординат точек и кривых I, II, и III в области давлений меньше $15\text{--}20 \Gamma/\text{см}^2$. Пунктирные участки кривых 1, 2 и 3 проведены после поправок, внесенных за счет солнечных космических лучей. Пересечение этих кривых с осью ординат дает интенсивность первичных частиц с энергиями от 0,1 до 4,6 Бэв . В табл. V приведены соответствующие данные об интенсивности первичного излучения для четы-

рех вычитания из результатов измерений на широте 64° данных на широте 41° позволяет получить высотные кривые, слабо изменяющиеся в области малых давлений. Кроме того, можно думать, что для разности чисел частиц процедура вычитания позволяет уменьшить, а возможно, практически исключить вклад частиц альбеда.

Примечательным в данных рис. 14 является то, что при общем росте числа частиц по кривым I—III приблизительно в 2,5 раза и по кривым I—4 в два раза высотные зависимости во всем диапазоне рассматриваемых давлений практически остаются как бы параллельными самим себе (более высокие точки для кривых I—III при давлениях меньше $15\text{--}20 \Gamma/\text{см}^2$ скорее всего обязаны частицам слабых вспышек космических лучей Солнца). Таким образом, полученные высотные кривые говорят в пользу того, что энергетический спектр первичных космических лучей, приходящих дополнительно на Землю в период минимума сол-

рех периодов измерений. Ошибки в данных — среднеквадратичные по измерениям в области давлений $5-15 \text{ Г/см}^2$. Полный поток первичной компоненты с $E \geq 0,1 \text{ Бэв}$ получен сложением интенсивности, получаемой

Таблица V

Интенсивность первичного космического излучения, $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ *)

$\Delta E_k \cdot \text{Бэв}$ Периоды измерений	$0,1 < E_k < 4,6$	$0,1 < L_k < 1,5$	$1,5 < L_k < 4,6$	$E_k > 0,1$
1. (V 1958—III 1959)	$0,77 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,04$	$1,04 \pm 0,03$
2. (XI 1959—XII 1960)	$0,95 \pm 0,02$	$0,26 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,03$	$1,24 \pm 0,02$
3. (I 1961—IX 1961)	$1,15 \pm 0,02$	$0,35 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,03$	$1,43 \pm 0,02$
4. (X 1961—XII 1961)	$1,43 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,06$	$0,80 \pm 0,07$	$1,73 \pm 0,04$

*) Данные в этой таблице находятся в хорошем согласии с результатами измерений, полученными при полетах советских автоматических межпланетных станций «Марс-1» и «Луна-4»⁴⁸.

по кривым 1—4, с интенсивностью, которая соответствует первичным энергиям $E > 4,6 \text{ Бэв}$ по работе⁴⁷ ($N(E > 4,6) = 0,30 \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ (1955 г.) и на 10% меньше для периода 1958 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основные флуктуации интенсивности космических лучей в стратосфере вызываются процессами, происходящими на Солнце.

2. Явление вспышек космических лучей в стратосфере обязано генерации космических лучей на Солнце во время хромосферных вспышек. Вспышки космических лучей, генерированные на Солнце, носят взрывной характер и приводят к тому, что интенсивность первичных космических лучей в межпланетном пространстве увеличивается в десятки, сотни и даже тысячи раз. Продолжительности вспышек, по наблюдениям в стратосфере, разные — от нескольких часов до нескольких суток.

3. Изучение явления вспышек космических лучей имеет и практическое значение для задач радиационной безопасности космонавтов в космическом пространстве. Прогнозирование вспышек космических лучей и предсказания ее мощности и характера распространения излучения в межпланетном пространстве является одной из практических задач современной космонавтики.

4. Вспышки космических лучей в стратосфере коррелируют с рядом геофизических явлений — поглощением галактического радиоизлучения в районах полярной шапки, геомагнитными бурями, ионосферными возмущениями и спадами в интенсивности галактических космических лучей — фобруш-понижениями.

5. Энергетические спектры протонов, генерированных во вспышках, с течением времени практически не меняются. Эти спектры близки между собою и в разных вспышках, что свидетельствует об универсальности формирования энергетического спектра протонов космических лучей на Солнце.

6. Существуют два резко различающихся между собой вида энергетического спектра протонов вспышек, получающихся по измерениям до

начала соответствующей геомагнитной бури и во время ее. В первом случае интегральный энергетический спектр, в зависимости от кинетической энергии протонов, аппроксимируется степенной зависимостью с показателем $\gamma \approx 2,0$, а во втором случае с $\gamma \approx 5,0$.

7. Энергетический спектр с показателем $\gamma \approx 2,0$ приписывается протонам, свободно распространяющимся от Солнца в межпланетном пространстве. Энергетический спектр с показателем $\gamma = 5,0$ приписывается протонам, локализованным и транспортируемым в корпускулярном потоке хромосферной вспышки, в процессе которой были генерированы космические лучи. Последнее заключение приводит к представлениям о существовании в корпускулярном потоке хромосферной вспышки своеобразных магнитных ловушек быстрых протонов, генерированных на Солнце.

8. Измеренные в стратосфере временные зависимости интенсивности протонов вспышек хорошо согласуются с данными теории диффузного распространения протонов космических лучей Солнца в среде с магнитными неоднородностями. Средняя длина свободного пробега протонов с энергией $\sim 0,2$ *Бэв* до рассеяния на магнитных неоднородностях составляет приблизительно $1/10$ *а. е.*

Найдена приближенно зависимость коэффициента диффузии протонов в межпланетной среде D от их импульса

$$D = \frac{1}{3} v l_0 p^k,$$

где v — скорость, p — импульс протонов, $k \approx 0,5$.

9. Полная кинетическая энергия, уносимая потоком протонов, генерированных в умеренной вспышке, составляет $\sim 10^{29}$ *эрг*.

10. Амплитуды интенсивности космических лучей во вспышках, генерированных на видимой стороне солнечного диска, примерно на два порядка больше по сравнению со вспышками, относящимися к генерации космических лучей на обратной стороне солнечного диска. Интерпретация этого явления приводит к выводу о существовании в межпланетном пространстве радиальных магнитных полей Солнца. Имеется оценка величин напряженностей этих полей ($\sim 10^{-6}$ *гс*).

11. Исследовано явление 27-дневных вариаций интенсивности космических лучей в стратосфере. Вариации эти существуют лишь на определенный период времени. Наиболее ярко выраженный эффект наблюдался в период с июля 1957 г. по февраль 1958 г. Найденная амплитуда 27-дневной волны составляла $5 \pm 0,6\%$. Форма волны близка к синусоиде. Наиболее вероятная трактовка явления связывается с модуляционными эффектами, вызываемыми корпускулярными потоками, исходящими из долгоживущих активных областей Солнца, которые существовали в течение семи оборотов Солнца.

12. Изучены флуктуации интенсивности космических лучей в стратосфере во время магнитных бурь, форбуш-понижений в стратосфере. Средний спектр вариаций интенсивности космических лучей, с энергиями $\epsilon > 2,5$ *Бэв*, во время форбуш-понижения аппроксимируется степенной зависимостью $\Delta D/D = A/\epsilon^\alpha$, где ϵ — полная энергия, $\alpha = 0,6 \pm 0,1$.

13. Рост интенсивности первичных космических лучей с уменьшением активности Солнца носит скачкообразный характер и хорошо коррелирует с общей активностью Солнца (по числу пятен). В рассматриваемый период спада активности Солнца (с 1958 г. до начала 1962 г.) интенсивность первичных космических лучей увеличилась в $\sim 1,7$ раза. Это увеличение происходит за счет первичной компоненты, в основном с энергиями, меньшими 4 *Бэв* (для протонов).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Рымко, В. Ф. Тулинов, А. Н. Чаракхьян, ЖЭТФ 36, 1687 (1959).
2. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, Геомагнетизм и аэронавтика 1 (2), 150 (1961).
3. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, ЖЭТФ 39, 249 (1960).
4. A. N. Charakhchyan, V. F. Tulinov, T. N. Charakhchyan, Proc. Cospar. Space Symp., vol. 4, North Holland, 1960, стр. 18.
5. J. R. Winckler, P. D. Bhavsar, L. Peterson. J. Geophys. Res. 64, 995 (1961).
6. Е. В. Горчаков, Г. А. Базилевская, Искусственные спутники Земли, № 8, 84 (1961).
7. А. Н. Чаракхьян, в сб. «Космические лучи», № 3, М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 134.
8. J. J. Quenby, G. J. Wenk, Phil. Mag. 81, No. 7 (1961).
9. А. С. Беспрозванная, В. М. Дриакши, в сб. «Исследования ионосферы», № 5, М., Изд-во АН СССР, стр. 7.
10. Н. И. Федякин, в сб. «Исследования ионосферы», № 5, М., Изд-во АН СССР 1960, стр. 20.
11. G. C. Reid, H. Leinbach, J. Geophys. Res. 64, 1801 (1959).
12. J. R. Winckler, P. D. Bhavsar, J. Geophys. Res. 65 (9), 2637 (1960).
13. L. R. Davis, K. W. Ogilvie, J. Geophys. Res. 67, No. 5 (1962).
14. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, ЖЭТФ 38, 1031 (1960).
15. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, ЖЭТФ, 735 (1961).
16. A. N. Charakhchyan, V. F. Tulinov, T. N. Charakhchyan, J. Phys. Soc. Japan 17, Suppl. A-II, 366 (1962).
17. В. П. Шабанский, Астрон. ж. 38, (5), 844 (1961).
18. С. И. Сироватский, в сб. «Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы», Рига, Изд-во АН Латв. ССР, 1961.
19. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, Геомагнетизм и аэронавтика 1 (4), 494 (1961).
20. A. N. Charakhchyan, V. F. Tulinov, T. N. Charakhchyan, J. Phys. Soc. Japan 17, Suppl. A-II, 360 (1962).
21. E. R. Ney, W. A. Stein, J. Geophys. Res. 67, 2087 (1962).
22. А. И. Кузьмин, Г. В. Скрипин, Тр. Якутского филиала АН СССР, сер. физ. 3, 121 (1960).
23. J. F. Steljes, H. Carmichael, K. G. McCracken, J. Geophys. Res. 66, 1363 (1961).
24. С. Н. Вернов, А. Е. Чудakov, Труды Международной конференции по космическим лучам (июль 1959 г.), т. 3, М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 17.
25. Л. И. Дорман, Вариации космических лучей, М., Гостехиздат, 1957.
26. P. Neuger, E. N. Parker, J. A. Simpson, Phys. Rev. 104, 768 (1956).
27. L. I. Dorman, Nuovo cimento 8, 391 (1958).
28. А. Н. Чаракхьян, Т. Н. Чаракхьян, Геомагнетизм и аэронавтика 2 (5), 829 (1962).
29. Э. Р. Мустель, Труды Конференции комиссии по исследованию Солнца «Физика солнечных корпускулярных потоков и их воздействие на верхнюю атмосферу Земли», М., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 8.
30. А. С. Дворяшин, Л. С. Левицкий, А. К. Панкратов, Изд. Крымской астрон. obs. 26, 90 (1961).
31. Е. Н. Паркер, в сб. «Солнечные корпускулярные потоки и их взаимодействие с магнитным полем Земли», М., ИЛ, 1962, стр. 37.
32. В. В. Виткевич, Докторская диссертация (ФИАН, 1962 г.).
33. С. Н. Вернов, В. Ф. Тулинов, А. Н. Чаракхьян, ДАН СССР 122, № 5 (1958).
34. М. А. Померанц, С. П. Агарваль и В. Р. Потниц, Труды Международной конференции по космическим лучам, т. IV, М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 61.
35. А. Н. Чаракхьян, В. Ф. Тулинов, Т. Н. Чаракхьян, сб. МГТ «Космические лучи», № 4, 173 (1961).
36. C. J. Fan, P. Neuger, J. A. Simpson, Phys. Rev. Letts. 4, 421 (1960).
37. C. J. Fan, P. Neuger, J. A. Simpson, Phys. Rev. Letts. 5, 269 (1960).
38. Данные нейтронного монитора Дип-Ривер (из 2-го Мирового центра).
39. Данные нейтронного монитора в Херстмоэ (из 2-го Мирового центра).

40. П. С. Фрайер, Е. П. Ней, Дж. Р. Винклер, Труды Международной конференции по космическим лучам, т. IV, М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 89.
 41. F. V. McDonald, W. R. Weber, J. Geophys. Res. **65**, 3859 (1960).
 42. А. А. Степанян, Изв. Крымской астроном. обш. **26**, 136 (1961).
 43. А. Эмерт, Х. Эрби, Труды Международной конференции по космическим лучам, т. IV, М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 79.
 44. Е. В. Коломеец, Г. А. Сергеева, К. Ф. Тарасова, в сб. МГГ «Космические лучи», № 4, 35 (1961).
 45. В. К. Бабарыкин, В. В. Баяревич, Ю. И. Стожков, Т. Н. Чаракчьян, Геомагнетизм и аэрономия **4** (3) (1964).
 46. Л. И. Дорман, Вариации космических лучей и исследование космоса. М., Изд-во АН СССР, 1963.
 47. А. Н. Чаракчьян, Т. Н. Чаракчьян, ЖЭТФ **35** (5), 1088 (1958).
 48. P. V. Vakulov, S. N. Vernov, E. V. Gorchakov, Yu. J. Logachev, A. N. Charakhchyan, T. N. Charakhchyan, A. F. Chudakov, CR-3 Proc. Space Res., IV, North Holland, Amsterdam, 1964.
-