

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Л. И. Дорман и Е. Л. Фейнберг

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение изменений интенсивности космических лучей составляет особый раздел физики космических лучей. Ему редко приписывалось сколько-нибудь самостоятельное значение. Несколько раз он привлекал к себе внимание более широких кругов физиков, когда из него «неожиданно» вырастали результаты, представляющие общезначительный интерес. Так, пожалуй, было в 1926 г., когда Миссвский и Тувим¹ обнаружили барометрический эффект — убывание интенсивности космических лучей на поверхности Земли при увеличении давления атмосферы. Такое убывание подтверждало факт поглощения космических лучей в атмосфере и, следовательно, давало новую возможность изучения проникающих свойств быстрых частиц в космических лучах.

Затем был обнаружен температурный эффект. В 1938 г. Блэккет² дал ему исключительно изящное объяснение. Это были годы, когда распад мезонов только-только был обнаружен, но опыты, доказывавшие его существование и позволившие определить время жизни, всё ещё не были убедительны. Блэккет, как известно, обратил внимание на то, что мезоны, если они нестабильны, должны образовываться в верхних слоях атмосферы, по прохождении первичной компонентой определённой массы воздуха. Поэтому при нагревании и соответственном расширении атмосферы (например, от зимы к лету) высота уровня генерации мезонов должна расти, путь их до Земли и распад — увеличиваться и интенсивность — падать. Оценка дала убедительное совпадение с экспериментами, хотя впоследствии оказалось, что изменения от ночи ко дню — намного меньше чем сезонные — имеют обратный знак (см. ниже). В те годы точность регистрации была невелика, расхождение цифр в 2—3 раза нельзя было принимать всерьёз. Изучение температурных вариаций космических лучей дало существенные

1 УФН, т. LIX, вып. 2

Вариации космических лучей

Тип вариации	$\lambda = 50^\circ$			
	Жёсткая компонента на уровне моря	Нейтроны на уровне моря или на уровне гор	Ионизирующая компонента на больших высотах	Жёсткая компонента под землей на глубине 60 м воды
1	2	3	4	5
Сезонные	2÷4	—*)	—	—
Суточные (маскирующие эффект внеземного происхождения) . .	$\approx 0,15$	—	—	—
11-летние	≈ 2	—	—	—
Годовые	0,5÷1	—	—	—
27-дневные	$\approx 0,3$	≈ 1	—	—
Суточные	$\approx 0,3$	$\approx 0,6$	$\approx 1\div 2$	$\approx 0,05$
Полусуточные	$\approx 0,03$	—	—	$\approx 0,02$
Уменьшения во время магнитных бурь	≈ 10	—	≈ 20	$< 0,5$
Возрастание во время больших солнечных вспышек****)	10÷40	≈ 550	—	$< 0,5$
Возрастание во время малых солнечных вспышек	$\approx 0,3^{**}$)	$\approx 0,6$	≈ 10	—
Звёздно-суточные	$\approx 0,02$	—	—	$< 0,02$

*) Прочерк означает отсутствие экспериментальных данных.

***) Возрастание интенсивности жёсткой компоненты космических лучей в отличие от других компонент, изменением температуры в верхних слоях товой радиации.

****) Если будет показано, что эти вариации действительно существуют.

*****) Во время последней вспышки 23 февраля 1956 года амплитуда на стр. 212).

Таблица I

(амплитуда в процентах)

$\lambda = 0^\circ$		Природа вариации	Происхождение
Жёсткая компонента на уровне моря	Нейтроны на уровне моря или на уровне гор		
6	7	8	9
$\approx 0,5$	—	Обусловлены изменением поглощения и распада мезонов в атмосфере при изменении метеорологических факторов	Атмосферного
$\approx 0,15$	—		
≈ 2	—	Обусловлены воздействием корпускулярных потоков, испускаемых Солнцем, на космические лучи (ускорением, торможением и рассеянием космических лучей магнитными полями, замороженными в потоках)	Внеземного (внеатмосферного)
$0,5 \div 1$	—		
$\approx 0,35$	—		
$\approx 0,35$	$\approx 0,43$		
$\approx 0,03$	—		
≈ 10	—		
$< 0,5$	—	Вызываются космическими лучами малой энергии, приходящими из Солнца. Механизмом генерации их на Солнце может быть статистический механизм ускорения	
—	—		
$\approx 0,02$	—	Могут обуславливаться неравномерным распределением источников космических лучей, диффузией космических лучей из Галактики (***)	Внеземного (внеатмосферного)

во время малых солнечных вспышек может, повидимому, обуславливаться, атмосферы из-за сопутствующего вспышке изменения потока ультрафиоле-

возрастания была на порядок больше приведённой здесь (см. примечание

сведения о времени жизни мезонов. В частности, оно показало, что «атмосферные» мезоны, которые мы теперь называем μ -мезонами, не могут быть теми «ядерными» мезонами, которые нужны были для объяснения ядерных сил и β -распада по теории Юкавы.

Этим, пожалуй, и исчерпываются существенные для физики элементарных частиц и космических лучей результаты, которые дало изучение вариаций.

Однако одновременно возрастало значение этих исследований для других вопросов — для проблемы происхождения космических лучей и для чисто астрофизических проблем. Именно эти проблемы и приобретают теперь особый интерес. Можно, пожалуй, сказать, что в течение последних лет изучение вариаций космических лучей постепенно превращается в независимый метод прощупывания физических условий в межзвёздной среде. Здесь мы получаем новый количественный метод, который независимо от других методов (оптический, радиоастрономический и т. п.) позволяет определять некоторые интересные астрофизические характеристики.

В настоящее время изучение вариаций космических лучей ведётся по всему миру сетью специальных станций непрерывной регистрации, существующей наряду со службой Солнца, сетью магнитных обсерваторий и других подобных систем непрерывного наблюдения. Эти станции регистрируют большей частью жёсткую компоненту космических лучей с помощью больших прецизионных ионизационных камер, покрытых слоем в 10 см свинца, имеющих различный объём (от 19 до 1000 л) и обеспечивающих точность измерения интенсивности космических лучей от 0,7% до 0,1% за час регистрации (в зависимости от объёма камеры). Производится также непрерывная регистрация счётчиковыми телескопами большой площади (примерно такая же точность, как у камер) и регистрация нейтронной компоненты с помощью больших нейтронных детекторов, построенных на принципе локальной генерации нейтронов в свинце, окружающем нейтронные счётчики³. Эти методы — основные, более или менее стандартизованные. Однако, кроме того, производятся и разнообразные специальные исследования.

Во всём мире имеется около 35 станций непрерывной регистрации, из них — 6 в СССР (Москва, Свердловск, Иркутск, Якутск, Мыс Шмидта, Тбилиси). Первыми по времени начала работы (1949 г.) и наиболее оборудованными советскими станциями являются станция Якутского филиала Академии наук СССР и станция Научно-исследовательского института земного магнетизма (Москва). В течение Международного геофизического года (1957—1958 гг.) число станций по всему миру возрастёт примерно до 75. Число опубликованных работ по вариациям в настоящее время измеряется сотнями. Уже сейчас накоплен огромный материал, который до последнего времени производил впечатление слабо систематизированного нагромождения данных. Были обнаружены сезонные,

суточные, одиннадцатилетние, полусуточные, 27-дневные колебания, часто разные на разных широтах и для разных компонент, изменения во время магнитных бурь, во время солнечных хромосферных извержений, изменение амплитуды и фазы суточного эффекта во время магнитных бурь и т. п. Некоторые сводные данные о масштабе различных вариаций можно найти в табл. I. Очень часто эти данные, полученные разными исследователями, представляли как взаимно противоречивые. Однако в самые последние годы вся ситуация начинает проясняться, в нагромождении фактов вырисовывается связная картина. Теперь уже, наоборот, обнаруживается недостаточность некоторых данных, необходимость новых измерений для уточнения количественных выводов.

§ 2. ВАРИАЦИИ И ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Амплитуда надёжно зарегистрированных в настоящее время вариаций измеряется процентами и долями процентов (исключение составляют изменения интенсивности во время хромосферных извержений на Солнце, см. табл. I). Это справедливо как для основного участка первичного спектра (энергия частиц $\sim 10^{10}$ эв), так и для специально исследованного участка энергий $\varepsilon > 10^{13} - 10^{14}$ эв (вариации частоты появления широких воздушных ливней).

Таким образом, поток космических лучей довольно постоянен во времени и изотропен.

Это постоянство само по себе является чрезвычайно важным фактом. Его можно было бы приписать только одному из двух обстоятельств. С одной стороны, может быть, что космические лучи распространяются прямолинейно и их источники равномерно распределены не только в нашей Галактике, но и вне её (если бы космические лучи, распространяясь прямолинейно, приходили только из нашей дискообразной Галактики, то наблюдалась бы асимметрия). Однако такая возможность представляется невероятной. В самом деле, из величины интенсивности потока космических лучей следует, что плотность энергии космических лучей в Галактике составляет около 1 эв/см^3 . Если бы такая же плотность была не только в Галактике, но и в межгалактическом пространстве, то это значило бы, что полная энергия космических лучей во вселенной (при средней плотности материи порядка 10^{-28} г/см^3) составляет примерно 10^{-5} от энергии покоя всей материи. Эта цифра представляется столь неразумно большой, что подобную возможность принято отвергать. Таким образом, остаётся другая возможность: космические лучи заперты в нашей Галактике, где их плотность гораздо больше, чем в межгалактическом пространстве. В таком случае добавляется фактор порядка 10^{-4} и их суммарная энергия составляет только 10^{-9} энергии покоя всей материи (столько же,

сколько на поверхности Солнца составляет кинетическая энергия атома водорода от его энергии покоя).

Причиной, удерживающей частицы в Галактике, может быть только межзвёздное магнитное поле. Изотропия потока космических лучей, малость их вариаций и явились первым свидетельством в пользу существования такого магнитного поля. В настоящее время как теоретические соображения, исходящие из магнитной гидродинамики Альфвена⁴, так и непосредственное изучение поляризации света звёзд при рассеянии на анизотропных межзвёздных пылинках, ориентирующихся в этом магнитном поле, приводят, по оценке С. Ё. Пикельнера, к значению напряжённости межзвёздного магнитного поля $H \sim 3 \cdot 10^{-6}$ эрстед⁵. Такого поля достаточно, чтобы не выпустить из Галактики (размеры $\rho \sim 10^{22} \div 10^{23}$ см) даже частицы с энергией $cp = 300H\rho = 300 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{22} \sim 10^{19}$ эв. Вслед за этим возникает другой вопрос: не могут ли космические лучи иметь только солнечное происхождение? В этом случае, чтобы давать изотропию в пределах солнечной системы, они должны были бы удерживаться в ней, и, следовательно, их траектории должны иметь радиус кривизны не больше 10^{14} см.

Внутри солнечной системы магнитное поле вряд ли может превосходить 10^{-4} эрстед. Если это так, то только часть космических лучей с энергией $cp < 300 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{14} = 3 \cdot 10^{12}$ эв могла бы иметь солнечное происхождение. Отсутствие значительных вариаций для частиц больших энергий указывает, таким образом, на их внесолнечное происхождение. Ряд дополнительных соображений (ср. § 9) указывает, что и в области $cp < 3 \cdot 10^{12}$ эв космические лучи солнечного происхождения не могут давать основной вклад.

§ 3. ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Разумеется, сказанное выше — только один и самый грубый пример того, как на основе вариаций космических лучей можно сделать выводы, существенные для проблемы происхождения космических лучей. Очевидно, что для более детального анализа нужно понять природу всех наблюдаемых вариаций, прежде всего, — сезонных и суточных, а также вариаций во время солнечных вспышек. Однако именно здесь до последнего времени существовало крайне запутанное положение. В самом деле, всё, что было известно о вариациях до сих пор — барометрический и температурный эффекты, — указывало именно на их атмосферное происхождение. Что же в многочисленных изученных вариациях имеет внесолнечную природу и какую именно?

Этот первый и вполне понятный вопрос долгое время был и в значительной мере и сейчас остаётся предметом дискуссий в мировой литературе. Чтобы ответить на него, нужно прежде всего аккуратно исключить из наблюдаемых вариаций эффекты атмосферного

происхождения. Здесь именно и возникли значительные расхождения в выводах.

Так, один из исследователей, Форбуш, на основании 10-летних наблюдений на руководимой им американской сети станций Института Карнеги пришёл к выводу, что сезонные вариации лишь наполовину имеют атмосферное происхождение^{6,7}. Другой, — Дюперье, в течение многих лет тщательно изучающий вариации в Лондоне⁸, пошёл дальше. Он попытался учесть тот общеизвестный факт, что распад π -мезонов, из которых в атмосфере возникают μ -мезоны, облегчается при повышении температуры, так как при уменьшении плотности воздуха понижается захват π -мезонов ядрами атомов воздуха. Поэтому нагревание стратосферы даёт возрастание числа π -мезонов и, следовательно, должен существовать положительный температурный эффект интенсивности μ -мезонов (в отличие от обычного, гораздо большего при наблюдении на уровне моря, отрицательного). Однако попытка учесть его с помощью эмпирических коэффициентов привела Дюперье к новым неувязкам. Так, время жизни π -мезонов, необходимое для внутренней согласованности результатов Дюперье при указанной интерпретации эффекта, оказывается в три раза большим его истинной величины⁹.

Далее, Додбир и Эллиот (Манчестер)¹⁰, приняв во внимание этот положительный температурный эффект, в отличие от Форбуша, пришли к выводу, что атмосферные сезонные вариации лишь маскируют истинные сезонные вариации внеземного происхождения и что эти истинные сезонные вариации имеют обратный знак (и ту же абсолютную величину), чем непосредственно наблюдаемые.

Было предпринято немало попыток чисто эмпирически согласовать различные результаты.

Оказалось, однако, что вопрос о правильном учёте и исключении метеорологических вариаций допускает довольно простое решение, и теперь, после многочисленных проверок и успешных применений, соответствующая методика уже ряд лет используется на советской сети станций. Исключая таким способом метеорологические вариации, удаётся получить ряд новых результатов и понять взаимные противоречия других авторов.

Прежде всего нужно учесть, что помимо эффекта изменения давления — простого поглощения, и эффекта сдвига уровня генерации мезонов (то, что обычно называли температурным эффектом) есть ещё один метеорологический эффект¹¹. Теряя в атмосфере энергию на ионизацию, мезон меняет своё время жизни. Если он потерял энергию в начале своего пути, то это скажется на его «вероятности выжить» сильнее, чем если такая потеря энергии произойдёт в конце пути. Поэтому даже при постоянном общем давлении и постоянной высоте уровня генерации вертикальное перемещение воздушных масс меняет наблюдаемую на уровне моря интенсивность μ -мезонов. Оказывается, что в реальной неравновесной атмосфере

этот эффект столь же существенен, как учитывавшиеся ранее. Поэтому, желая учесть метеорологические вариации, мы не можем опираться только на изменение температуры на уровне моря, или в стратосфере, или на каком-либо другом изобарном уровне. Необходимо учитывать весь температурный разрез атмосферы над точкой наблюдения. Можно довольно просто вывести формулу, полностью определяющую наблюдаемое изменение δN_μ интенсивности μ -мезонов N_μ на данном уровне с давлением h_0 , если известно изменение давления в этой точке δh_0 и изменения температуры $\delta T(h)$ на всех уровнях с давлением h от точки наблюдения до точки генерации μ -мезонов с давлением h_1 . Сначала такая формула была получена¹¹ для «одномезонной схемы», предполагающей генерацию μ -мезонов на одном определенном изобарическом уровне (зависимость от h_1 — слабая, логарифмическая). Применение уже этой приближенной схемы дало хорошие результаты. Как для данных Якутской станции 1949 г., так и для опубликованных данных станции Челтенхэм (вблизи Вашингтона) за 1937—1946 гг. обнаружилось, что сезонные вариации почти нацело сводятся к метеорологическим. Коэффициент корреляции между метеорологическими изменениями δN_μ , предвычисленными на основе упомянутой формулы, в которую подставляются данные радиозондовых измерений температуры, с одной стороны, и наблюдаемыми вариациями δI_μ — с другой, достигает чрезвычайно высоких значений (0,90 и выше). Для Якутска сезонные метеорологические вариации исключительно высоки, амплитуда достигает 5% (на экваторе амплитуда сезонных колебаний в десять раз меньше). Поэтому столь хороший результат для Якутска указывает, что на высоких широтах сезонный эффект действительно практически полностью сводится к метеорологическому. Затем эта теория была улучшена¹². Было учтено, что μ -мезоны образуются по всей атмосфере вследствие распада π -мезонов; был учтен также ряд других существенных обстоятельств. Выводы этой полной теории можно представить формулой

$$\frac{\delta N_\mu}{N_\mu} = \beta \delta h_0 + \int_0^{h_0} W(h) \delta T(h) dh. \quad (1)$$

Здесь β — барометрический коэффициент, который обычно определяют эмпирически, но в настоящей схеме он может быть вычислен теоретически и оказывается в согласии с экспериментом. Что же касается функции $W(h)$, то она имеет смысл «плотности температурного коэффициента» (прежнее простое понятие температурного коэффициента здесь утрачивает своё значение). Она может быть разбита на два слагаемых W_μ и W_π , дающих соответственно влияние распада μ -мезонов (отрицательный вклад) и влияние распада π -мезонов (положительный вклад). Эта функция W изображена на рис. 1 для двух случаев: на рис. 1, а — для наблюдений глобаль-

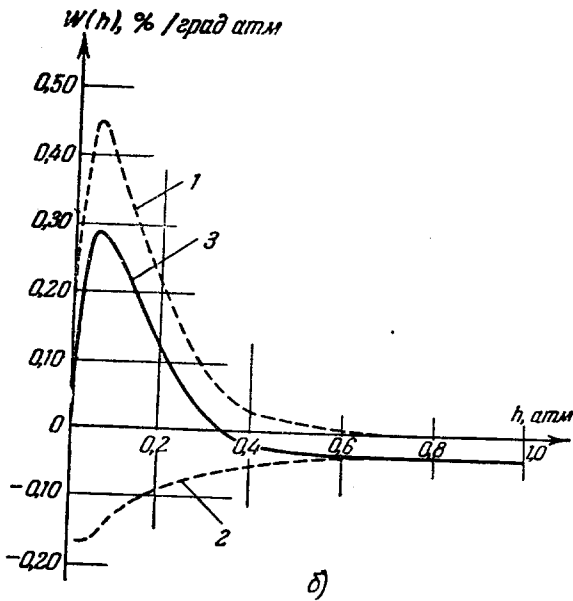
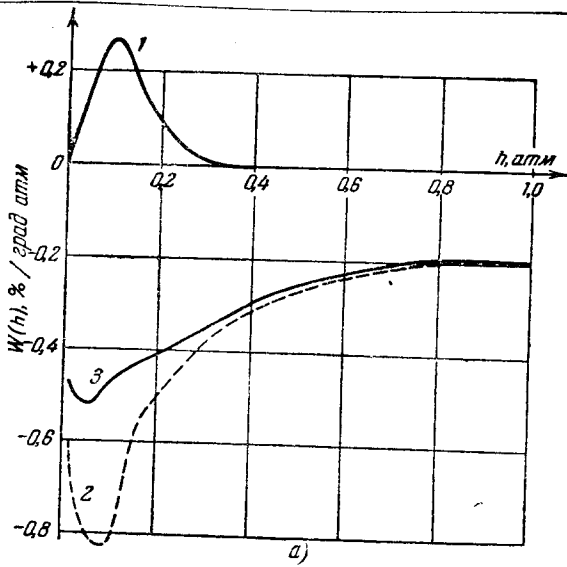


Рис. 1. Плотность температурного коэффициента. а — на уровне моря, б — на глубине 70 м водного эквивалента. Кривая 1 — $W_{\pi}(h)$; кривая 2 — $W_{\mu}(h)$; кривая 3 — $W(h) = W_{\pi}(h) + W_{\mu}(h)$.

ной интенсивности жёсткой компоненты на уровне моря; на рис. 1, б — для наблюдений жёсткой компоненты под Землёй (на глубине, эквивалентной по поглощению 70 м воды). При вычислении W не используются никакие произвольные постоянные, помимо обычных

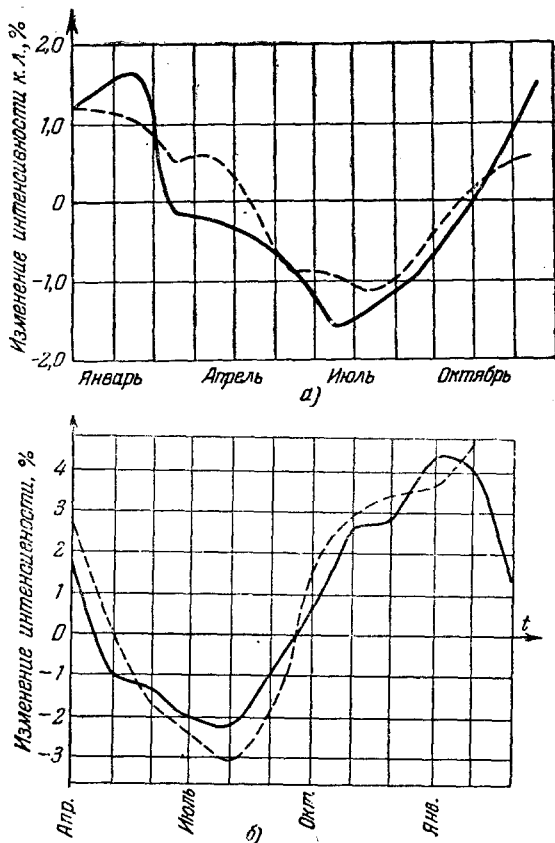


Рис. 2. Сезонные вариации жёсткой компоненты космических лучей на уровне моря: а — в Челтенхэме («одномесячная схема»), б — в Якутске («двухмесячная схема»). Сплошная кривая — эксперимент, пунктир — вклад метеорологического эффекта.

констант. В неё входят лишь времена жизни мезонов, ионизационные потери частиц, коэффициенты поглощения первичной компоненты в атмосфере и показатель спектра π -мезонов, генерируемых при столкновении протонов с ядрами (к погрешностям двух последних величин результат расчёта мало чувствителен). Теперь, зная из радиозондовых измерений $\delta T(h)$, с помощью этой кривой легко

вычислить δN_p . Эта «двухмезонная схема» применялась в течение нескольких лет. Результаты были изложены в¹³. Они частично даны на рис. 2 и 3. Некоторые более подробные результаты можно найти, например, в¹⁴.

Становится очевидным, что сезонные вариации, по крайней мере на умеренных и высоких широтах, почти целиком метеорологического происхождения. Что касается суточных вариаций, то здесь решение вопроса несколько затруднено потому, что их амплитуда на порядок меньше, чем у сезонных. Поэтому ошибки измерения

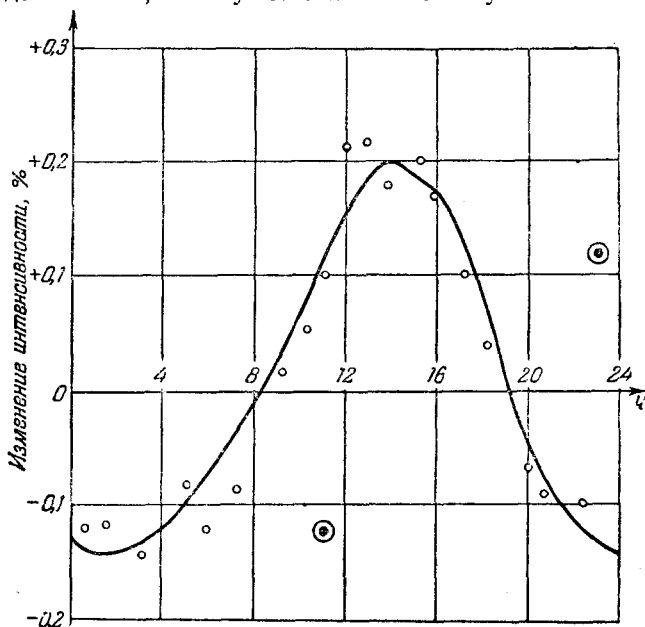


Рис. 3. Суточные вариации (Якутск, среднее за два года). Кружки и кривая — измерения, ⊙ — рассчитанный метеорологический эффект.

температуры становятся очень существенными. Тем не менее, исследование, проведенное в Якутске А. И. Кузьминым^{14, 15}, показало (рис. 3), что метеорологические вариации маскируют истинные суточные вариации внеземного происхождения. После вычитания метеорологического эффекта суточные вариации возрастают примерно вдвое. Это было подтверждено в более подробном исследовании Е. С. Глоковой¹⁶, получившей также ещё один результат.

Давно было известно, что амплитуда суточных вариаций различна в разные сезоны. Оказалось, однако, что если учесть метеорологические изменения описанным выше способом, то суточный эффект сохраняет постоянство в течение года. На рис. 4 дана

разность интенсивностей в 14 часов и в 2 часа, а также в 17 часов и в 5 часов местного времени для Москвы.

Вывод о существовании суточного эффекта внеземного происхождения подтверждает давно известные результаты остроумных экспериментов со скрещенными телескопами^{17, 18, 19}. В последнем из них измерялась на широте около 45° разность показаний двух скрещенных телескопов, направленных под углом 90° друг к другу: один — вдоль земной оси, другой — перпендикулярно к ней. При

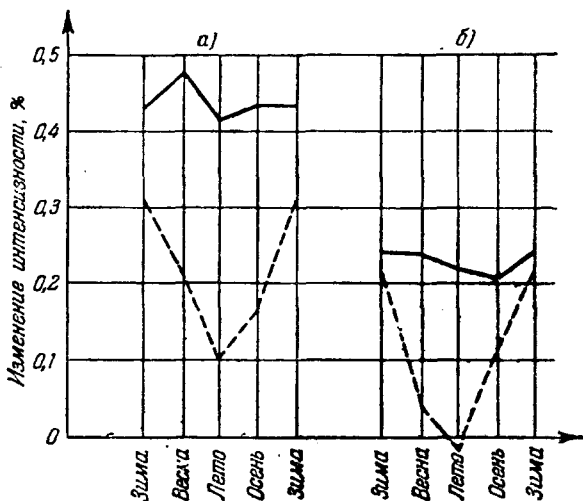


Рис. 4. Зависимость суточных вариаций жесткой компоненты космических лучей на уровне моря от времени года (Москва): а) разность интенсивностей 14 ч.—2 ч.; б) разность интенсивностей 17 ч.—5 ч. Пунктир—измерения, сплошная кривая — метеорологический эффект исключен.

этом метеорологический эффект автоматически исключался, и тем не менее суточные колебания интенсивности оставались.

Ни в одном случае применения описанного метода*) не было обнаружено внутренних противоречий. Как же в таком случае понять упоминавшиеся выше взаимные противоречия ряда экспериментаторов? Можно показать²², что эти противоречия кажущиеся и связаны именно с неправильным учетом метеорологических колебаний. В этих работах, использующих прежнюю методику единых барометрического и температурного коэффициентов, не могла быть

*) Впоследствии этот метод был независимо предложен другими исследователями, которым, повидимому, были неизвестны работы^{11, 12, 13}. Так, одномерная схема¹¹ была опубликована Ольбертом²⁰, двухмерная — Маеда и Вада²¹. Однако сколько-нибудь развернутого применения и проверки эти методы у упомянутых авторов не нашли.

учтена специфика колебаний состояния неравновесной атмосферы. Так, например, здесь существенное значение имеет то обстоятельство, что в Англии в стратосфере летом холоднее, чем зимой, но днём теплее, чем ночью и т. п. Подобные весьма распространённые инверсии не могут быть учтены, если пользоваться понятием единичных коэффициентов.

Таким образом, мы можем учитывать и исключать из наблюдаемых вариаций влияние изменения метеорологических условий. В настоящее время точность здесь лимитируется точностью радиозондо-

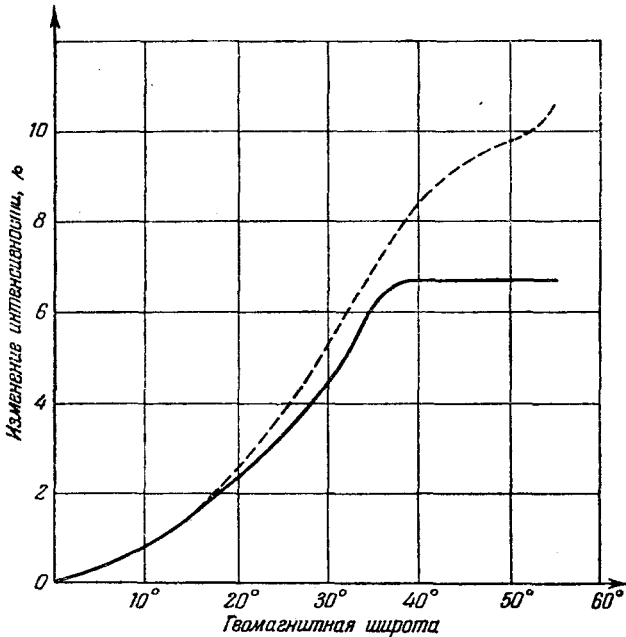


Рис. 5. Широтный эффект интенсивности μ -мезонов на уровне моря. Пунктир—измерения, сплошная кривая—метеорологический эффект исключён.

вых измерений температуры атмосферы. Как показывает анализ¹⁶, надёжно исключать метеорологические эффекты порядка долей процента можно только производя статистическую обработку. В частности, если учитывать метеорологический эффект в течение одних выбранных суток, то ошибки могут быть велики. При усреднении же, например, за один месяц результат получается убедительным.

Этот метод был использован и для изучения ряда других вопросов. Так, например, довольно давно Купферберг²³ высказал предположение, что широтный эффект жёсткой компоненты на уровне моря может быть в существенной мере объяснён как следствие разности температур атмосферы на разных широтах. Это обстоятель-

ство может быть теперь точно учтено. Используя усреднённые за много лет данные относительно распределения температур в атмосфере, удалось показать²⁴, что широтный эффект не может быть объяснён разностью температур на разных широтах. Однако правильный учёт метеорологических условий меняет кривую широтного эффекта жёсткой компоненты и несколько смещает положение

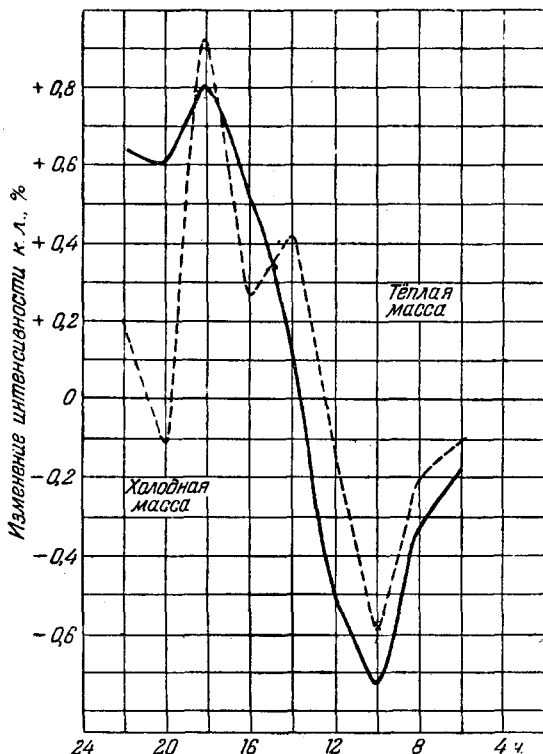


Рис. 6. Прохождение холодного фронта (Якутск, 16 апреля 1951 г.). Сплошная кривая—измерения, пунктир—рассчитанный метеорологический эффект.

«колена» (рис. 5), так что кривая показывает видимое отсутствие первичных частиц с энергией меньше 7 *Бэв*. Разумеется, это просто означает, что первичные частицы с энергией менее 7 *Бэв* не могут давать μ -мезонов, способных дойти до уровня моря. Такой вывод хорошо согласуется с известными независимыми результатами²⁵.

Метеорологические колебания интенсивности космических лучей возникают также при прохождении воздушных фронтов. Этот эффект был замечен уже давно²⁶. Д. Д. Красильников^{14, 27} подверг его в Якутске тщательному изучению на материале 107 фронтов.

На рис. 6 для одного выбранного фронта сравнены результаты измерения интенсивности μ -мезонов $\frac{\partial I_{\mu}}{I_{\mu}}$ и метеорологические изменения $\frac{\partial N_{\mu}}{N_{\mu}}$, вычисленные по формуле (1) на основании измерений температуры в атмосфере, проводившихся каждые 2 часа. Разумеется, здесь ошибки индивидуальных измерений температуры слишком велики, чтобы можно было ожидать лучшего совпадения.

§ 4. КОРРЕЛЯЦИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ АСТРОФИЗИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Итак, влияние метеорологических изменений может быть исключено. По какому пути следует теперь идти при объяснении остающихся вариаций космических лучей?

Можно изучать корреляцию этих вариаций с такими явлениями, как солнечные хромосферные извержения, число солнечных пятен, возмущение магнитного поля Земли. Этим путём в основном шли все исследователи. В частности, во время четырёх изученных до сих пор за 20 лет хромосферных вспышек на Солнце были зарегистрированы резкие (до сотен процентов) возрастания интенсивности космических лучей. Угасание этого эффекта при углублении потока в атмосферу и распределение эффекта по земному шару ясно показали, что на Землю во время такой вспышки падало дополнительное количество частиц сравнительно низких энергий, примерно до 10 *Бэв*²⁸. Можно предположить, что эти частицы были испущены Солнцем. Однако доказать это нужно особо.

Далее было установлено, что во многих случаях магнитные бури сопровождаются значительным (на несколько процентов) спаданием интенсивности космических лучей. Однако, удивительным образом, в ряде случаев такие же бури не сопровождаются изменениями потока космических лучей²⁸.

В настоящее время можно считать установленным, что магнитные бури возникают под влиянием ионизованных потоков (в целом нейтральных), которые постоянно испускаются Солнцем и в некоторых случаях захватывают Землю. Именно в этих случаях они образуют на очень больших высотах токи, возмущающие магнитное поле Земли. Скорость потоков в некоторых случаях может быть измерена по запаздыванию магнитной бури относительно каких-нибудь солнечных явлений, указывающих на начало испускания потока (эта скорость невелика — порядка 10^8 *см/сек*), а ширина — по длительности бури, по времени прохождения Земли сквозь поток. Изучение этих потоков имеет чрезвычайно большое значение для геофизики, для прогнозирования прохождения радиоволн и т. п. Корреляция некоторых вариаций космических лучей с магнитными

бурями естественно наводит на мысль, что и они каким-то образом связаны с корпускулярными потоками. Но какова эта связь — имеет ли место одновременно с испусканием потоков также испускание космических лучей Солнцем или сами потоки влияют на космические лучи, идущие издалека? Последнюю точку зрения выдвинул

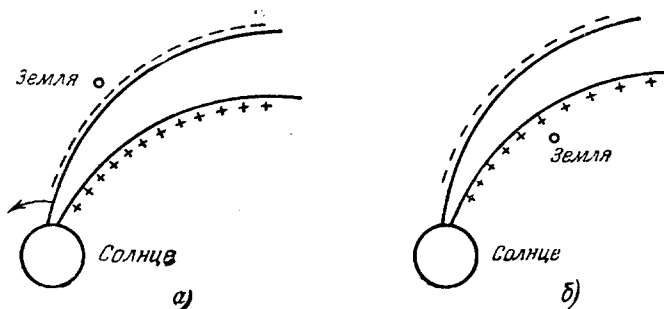


Рис. 7. Эффект магнитной бури (по Альфвену, поляризация потока в общем магнитном поле Солнца): *а* — до бури (интенсивность космических лучей возрастает), *б* — после бури (интенсивность космических лучей падает).

Альфвен⁴ и использовали Долбир и Эллиот²⁹. Действительно, такой ионизованный поток, движущийся со скоростью u , в общем магнитном поле Солнца $H^{(c)}$ поляризуется. Если $H^{(c)}$ перпендикулярно u , то создаётся электрическое поле, направленное поперёк, такое, что при пересечении потока ширины l энергия частицы ϵ меняется на

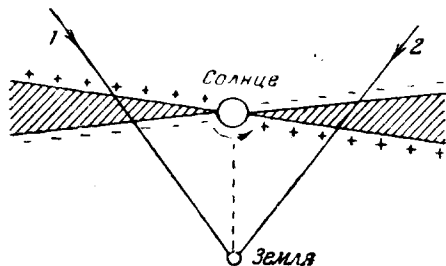


Рис. 8. Суточный эффект космических лучей (по Эллиоту и Долбиру, поляризация потоков в общем магнитном поле Солнца). *1* — интенсивность космических лучей возрастает, *2* — интенсивность космических лучей падает.

Однако в таком простом виде, как было ясно самому Альфвену⁴, гипотеза ещё недостаточна (см. § 7).

Изучение подобных корреляций производилось многими авторами. Однако они встретились с серьёзными трудностями из-за искажающего влияния метеорологических факторов.

$$\delta\epsilon = \pm 300 \frac{u}{c} l H^{(c)}.$$

Это поле тормозит одни частицы космических лучей, ускоряет другие. Отсюда могут возникнуть вариации космических лучей, коррелирующие с появлением потоков и, следовательно, магнитных бурь (рис. 7 и 8).

Систематическое исследование этого вопроса было предпринято недавно Е. С. Глоковой¹⁶, которая искала соответствующие корреляции после исключения вариаций метеорологического происхождения. При этом обнаружались существенные факты.

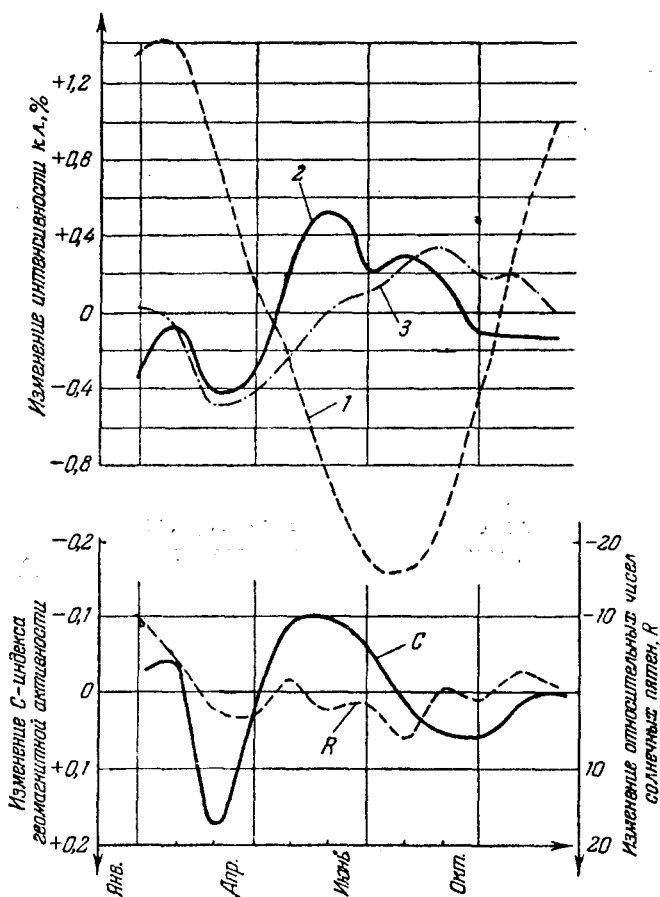


Рис. 9. Годовые вариации космических лучей и магнитная активность. 1 — измерения (Челтенхэм); 2 — метеорологический эффект исключён (Челтенхэм); 3 — измерения (Гуанкайю); C — индекс магнитной активности (левая шкала); R — относительные числа солнечных пятен, числа Вольфа (правая шкала).

Оказалось возможным изучить даже тот, сравнительно малый, остаток сезонных вариаций, который получается после исключения больших сезонных атмосферных вариаций.

На рис. 9 показано, что для станции Челтенхэм (около Вашингтона, США) этот остаток хорошо коррелирует с C—индек-

сом *) магнитной активности и гораздо хуже коррелирует с индексом числа солнечных пятен **) R . На экваториальной станции Гуанкайо метеорологические колебания очень малы, учесть их не удалось из-за отсутствия в литературе соответствующих метеорологических данных. Однако видно, что неметеорологический остаток для Челтенхэма близок к полному эффекту в Гуанкайо.

Подобно этому Глокова показала, что и многие другие вариации космических лучей, — вариации, сопровождающие магнитные бури, 27-дневные вариации и т. п. хорошо коррелируют с колебаниями магнитной активности. Всё это свидетельствует о том, что существует только три сорта вариаций: 1) атмосферные; 2) связанные с хромосферными извержениями на Солнце; 3) связанные с возмущениями магнитного поля Земли, т. е. повидимому, с испусканием нейтральных потоков медленных частиц из Солнца.

Однако, разумеется, подобный чисто статистический подход не может считаться достаточным.

§ 5. КОЭФФИЦИЕНТЫ СВЯЗИ И ПЕРВИЧНЫЕ ВАРИАЦИИ

Прежде всего необходимо указать количественный метод, который позволил бы по наблюдаемым вариациям различных компонент на разных уровнях, после того как исключены метеорологические вариации, определять соответствующие им вариации первичной компоненты на границе атмосферы и притом для разных участков энергетического спектра. Оказалось возможным решить эту задачу^{30, 31}, не производя каких-либо расчётов размножения частиц в атмосфере, а опираясь только на известные уже экспериментальные данные, касающиеся геомагнитных эффектов, подобно тому, как это делалось Низром³² при расчёте «кратности», в³ для нахождения «функции удельного выхода» и в³³ — при расчёте «эффективных спектров».

Действительно, пусть на широте λ , на уровне с давлением h , мы измеряем интенсивность i -й компоненты космических лучей $N_{\lambda}^i(h_0)$ (разные значения i соответствуют жёсткой компоненте, нейтронной

*) Согласно международному соглашению, каждый день на любой магнитной обсерватории характеризуется так называемой геомагнитной характеристикой, визуально оцениваемой по ленте с записью поля. Дни со спокойными магнитными условиями обозначаются числом 0. Сильно возмущённые дни — числом 2. Дни же со средней возмущённостью характеризуются числом 1. Из чисел 0, 1 и 2, полученных на всех обсерваториях мира за сутки, в центральном бюро выводится среднее (с точностью до десятых долей) для каждого дня. Это среднее получило название международной геомагнитной характеристики (или C — индекса) данного дня.

**) Относительные числа солнечных пятен Вольфа (R — индекс) получают для каждого дня путём умножения числа раздельно видимых на всём солнечном диске групп пятен на 10 и прибавления к ним числа индивидуальных пятен.

и т. п.). Если первичный поток на границе атмосферы имеет энергетический спектр $D(\epsilon)$, то, очевидно:

$$N_{\lambda}^i(h_0) = \int_{\epsilon_{\lambda}^{\min}}^{\infty} D(\epsilon) m^i(\epsilon, h_0) d\epsilon, \quad (2)$$

где $m^i(\epsilon, h_0)$ — «множитель продуктивности», показывающий, какой вклад в N_{λ}^i даёт одна первичная частица энергии ϵ , а $\epsilon_{\lambda}^{\min}$ — минимальная энергия, которой должна на данной широте λ обладать первичная частица, чтобы преодолеть геомагнитный барьер.

Когда вследствие каких-либо астрофизических причин $D(\epsilon)$ меняется на величину $\delta_j D(\epsilon)$ (разные значения j обозначают: «сезонные», «суточные» и т. д.), то наблюдаемая интенсивность N_{λ}^i меняется на $\delta_j N_{\lambda}^i(h_0)$. Варьируя обе стороны равенства (2), имеем:

$$\frac{\delta_j N_{\lambda}^i(h_0)}{N_{\lambda}^i(h_0)} = \int_{\epsilon_{\lambda}^{\min}}^{\infty} W_{\lambda}^i(\epsilon, h_0) \frac{\delta_j D(\epsilon)}{D(\epsilon)} d\epsilon, \quad (3)$$

где обозначено:

$$W_{\lambda}^i(\epsilon, h_0) = \frac{D(\epsilon) m^i(\epsilon, h_0)}{N_{\lambda}^i(h_0)}. \quad (3a)$$

$W_{\lambda}^i(\epsilon, h_0)$ — «коэффициент связи» (в %/Бэв), показывающий, какую «вторичную вариацию», измеряемую в % (т. е. вариацию i -й компоненты, наблюдаемую на уровне с давлением h_0), вызовет удвоение потока первичных частиц с энергией ϵ в интервале 1 Бэв. Её, как оказывается, можно определить, не зная механизма мультипликации в атмосфере.

Действительно, дифференцируя равенство (2) по нижнему пределу интеграла $\epsilon_{\lambda}^{\min}$, мы получим:

$$W_{\lambda}^i(\epsilon_{\lambda}^{\min}, h_0) = - \frac{1}{N_{\lambda}^i(h_0)} \frac{\partial N_{\lambda}^i(h_0)}{\partial \epsilon_{\lambda}^{\min}}. \quad (4)$$

Если мы ограничимся рассмотрением той части космических лучей, которая чувствительна к магнитному полю Земли, то правая сторона в уравнении (4) может быть получена из эмпирической кривой, дающей зависимость интенсивности данной компоненты от широты. В самом деле, $\epsilon_{\lambda}^{\min}$ зависит, и притом хорошо известным образом, только от λ . Следовательно,

$$\frac{\partial N_{\lambda'}^i}{\partial \epsilon_{\lambda'}^{\min}} = \frac{\partial N_{\lambda'}^i}{\partial \lambda'} \frac{d\lambda'}{d\epsilon_{\lambda'}^{\min}}.$$

Значит, если для данной компоненты на данной высоте (h_0) изучена

широтная зависимость (а она хорошо изучена для многих компонент на разных h_0), то можно вычислить и $W_\lambda^i(\varepsilon, h_0)$, по крайней мере для $\varepsilon \leq \varepsilon_0 = 15$ Бэв (пока космические лучи чувствительны к магнитному полю).

Для больших энергий всё, что можно пока сделать — это пойти по пути экстраполяции. Именно, можно исходить из некоторого аналитического вида функции W . В качестве такового была взята ^{30,31} функция с тремя произвольными параметрами k, a, b :

$$W_\lambda^i(\varepsilon, h_0) = k \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{-a + \frac{b}{\varepsilon/\varepsilon_0}}, \quad \varepsilon \geq \varepsilon_0 = 15 \text{ Бэв.} \quad (5)$$

Указанные три параметра определяются из условия нормировки (легко видеть, что должно быть $\int_{\varepsilon_\lambda^{\min}}^{\infty} W_\lambda^i(\varepsilon, h_0) d\varepsilon = 100\%$ *) и из требования непрерывности функции и её производной при $\varepsilon = \varepsilon_0$.

На рис. 10 приведены полученные таким образом значения коэффициентов связи для четырёх компонент, именно: 1) для полной интенсивности на большой высоте (ионизирующая компонента); 2) для нейтронной компоненты на уровне моря; 3) для полной интенсивности на высоте 4300 м; 4) для мезонной компоненты на уровне моря. Все — для трёх геомагнитных широт: $\lambda = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ$. Пунктиром даны кривые в области, где применена экстраполяция, и потому результаты менее надёжны.

Эти кривые позволяют сразу проверить ту или иную теорию происхождения вариаций космических лучей. Подставляя значения $\frac{\delta D}{D}$, даваемые этой теорией, и W_λ^i , указываемые графиками, в формулу (3), можно сравнить результат с экспериментальными данными.

Но можно попробовать решить и гораздо более важную обратную задачу. Именно, используя данные наблюдения вариаций, $\delta_j N_\lambda^i(h_0), N_\lambda^i(h_0)$, можно попытаться найти первичные вариации. Если экспериментальные данные достаточно обильны, то эту задачу можно решить с желаемой точностью. Мы сейчас опишем опыт применения этой методики к суточным вариациям и к вариациям, связанным с солнечными вспышками.

Современный объём экспериментальных данных оказывается не вполне достаточным для этой цели. В частности, желательно иметь

*) В самом деле, этот интеграл даёт относительное изменение интенсивности, соответствующее удвоению интенсивности первичной компоненты ($\frac{\delta D}{D} = 1$).

больше данных относительно вариаций нейтронной компоненты на различных широтах, о фазах и амплитудах суточного эффекта и т. д. Тем не менее, мы склонны думать, что предпринятая попытка^{30, 31} найти спектр первичных вариаций оказалась успешной. Внутренняя согласованность полученных результатов подсказывает, что эти результаты, по крайней мере качественно, достаточно надёжны. По мере накопления экспериментальных данных результаты такого анализа могут в той или иной мере измениться, и во всяком случае точность повысится. Имея в виду эти замечания, мы перейдём к изложению результатов исследования^{30, 31}.

Удаётся показать, что все измеренные до настоящего времени суточные вариации (разных компонентов на разных высотах, всего около 10 эффектов) можно приписать суточной вариации первичной компоненты, описываемой функцией

$$\frac{\delta D(\epsilon)}{D(\epsilon)} = \begin{cases} 0 & \text{для } \epsilon < \epsilon_{\text{крит}}^{(1)} \sim 7 \text{ Бэв,} \\ a\epsilon^{-1} & \text{для } \epsilon > \epsilon_{\text{крит}}^{(1)} \sim 7 \text{ Бэв.} \end{cases} \quad (6)$$

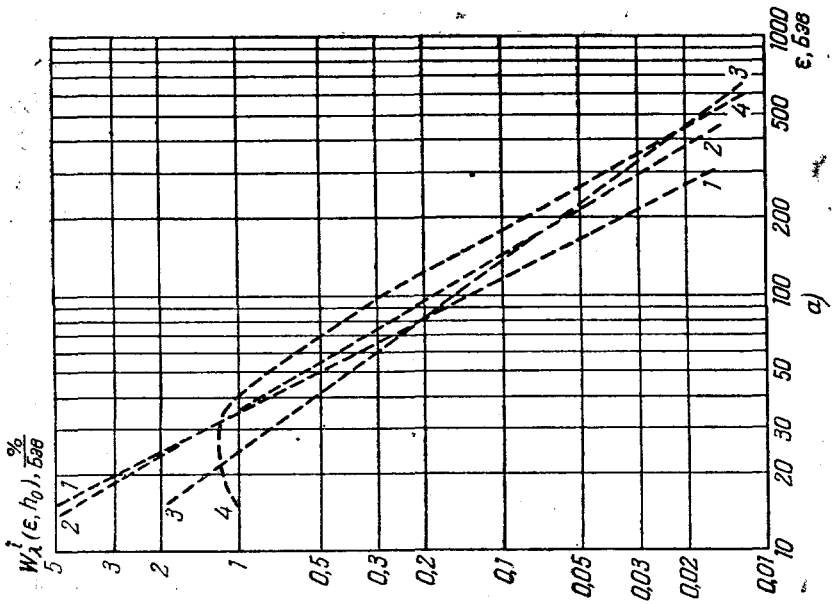
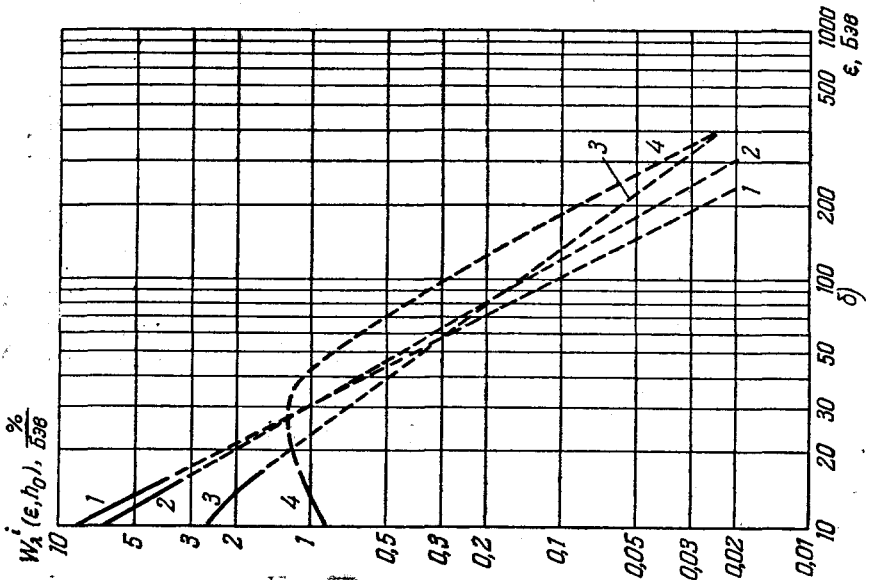
Значение коэффициента a , строго говоря, зависит от широты точки наблюдения (см. § 7). Для умеренных широт ($\lambda \leq 50^\circ$) можно считать $a \approx 0,14 \text{ Бэв}$. Однако зависимость от широты ведёт к дальнейшим интересным выводам. Конечно, такой вид δD даёт очень грубо, но при современном объёме экспериментальных данных на большее трудно рассчитывать. Вычисления показывают достаточно определённо, что $\frac{\delta D}{D}$, не зависящее от энергии, или имеющее существенно иное значение $\epsilon_{\text{крит}}^{(1)}$, или заметно иной показатель при ϵ в области $\epsilon > \epsilon_{\text{крит}}^{(1)}$, приводят к противоречиям с опытом. Более точное определение δD требует дополнительных экспериментальных данных.

Подобным же образом показывается, что наилучшее согласие с измеренными вариациями для известной солнечной вспышки 19 ноября 1949 г. достигается, если предположить, что

$$\frac{\delta D(\epsilon)}{D(\epsilon)} = \begin{cases} 11 \div 12 & \text{для } \epsilon < \epsilon_{\text{крит}}^{(2)} \approx 12 \text{ Бэв,} \\ 0 & \text{для } \epsilon > \epsilon_{\text{крит}}^{(2)} \approx 12 \text{ Бэв.} \end{cases} \quad (7)$$

Другие испробованные спектры ($\frac{\delta D}{D}$ не зависит от энергии, либо имеет степенной характер при ϵ , превосходящем некоторое $\epsilon_{\text{крит}}$, или, наоборот, при $\epsilon < \epsilon_{\text{крит}}$ и т. п.), приводили к противоречию с опытными данными (всего 6 различных эффектов).

Заметим, что этот спектр согласуется с тем спектром, который независимо предложил Файрор³⁴ для объяснения наблюдавшегося



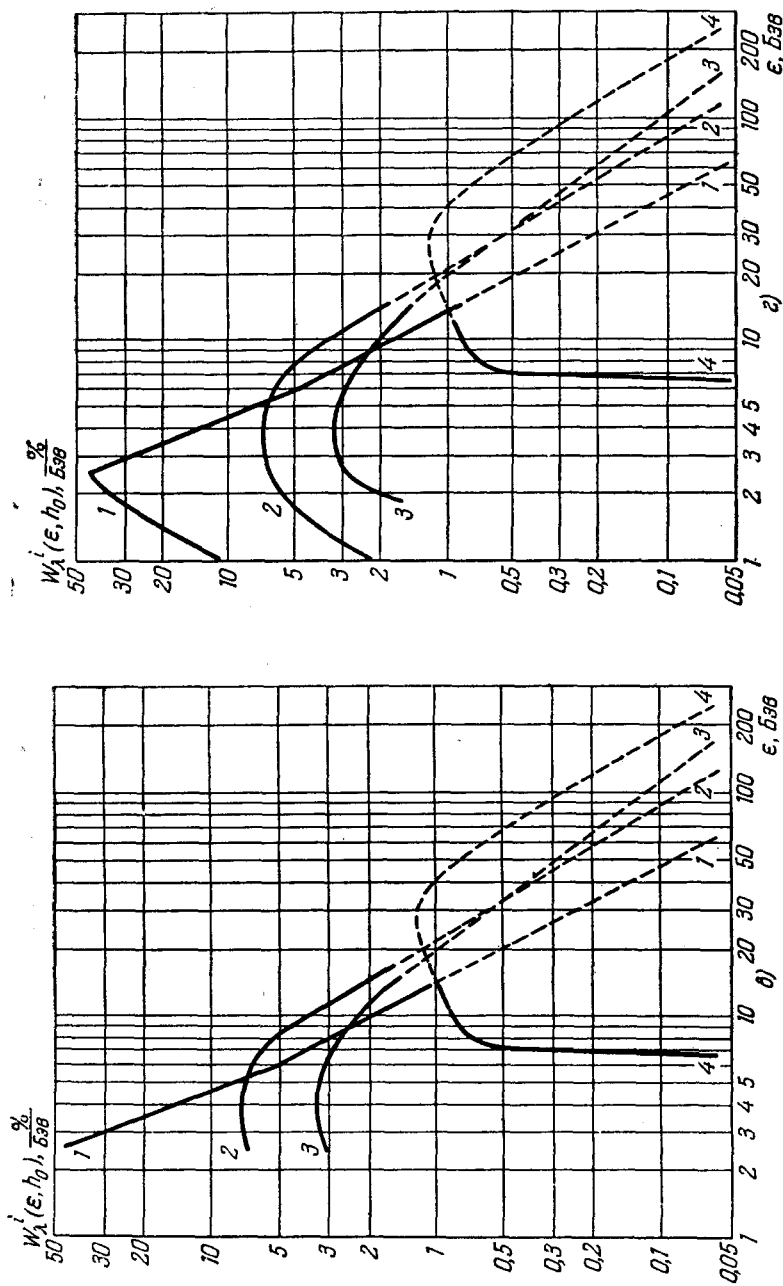


Рис. 10. Коэффициент связи. $\alpha - \lambda = 0^\circ$; $\beta - \lambda = 30^\circ$; $\epsilon - \lambda = 50^\circ$; $\delta - \lambda = 80^\circ$. 1 — общая ионизирующая компонента на больших высотах, 2 — нейтроны на уровне моря или на уровне гор, 3 — общая ионизирующая компонента на уровне гор (4300 м), 4 — жесткая компонента на уровне моря, — вычислено из широтного эффекта, — экстраполировано.

распределения вариаций космических лучей по земному шару во время больших солнечных вспышек.

Для нас важно, что спектр суточных вариаций резко отличается от спектра вариаций, связанных с солнечной вспышкой.

§ 6. РАСПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ И ВАРИАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКОЙ

Знание первичных вариаций $\frac{\delta D}{D}$, т. е. знание количества, энергии и момента прихода на границу атмосферы частиц, дополнительно попадающих на Землю, позволяет узнать многое о местоположении, мощности и характере действия источников этого дополнительного излучения.

В самом деле, можно прежде всего реконструировать в магнитном поле Земли пути этих частиц. Так определяется направление на источник дополнительного излучения. Это исследование^{30, 31} выполняется численным способом на основе существующих в литературе данных о траекториях заряженных частиц в магнитном поле Земли^{35, 36}. Результаты показывают, что избыточное излучение, приходящее во время солнечного хромосферного извержения, идёт от Солнца. Что же касается суточных вариаций, то их источник расположен в направлении, образующем угол $82 \pm 8^\circ$ с линией Земля — Солнце, слева от неё. Замечательно, что это относительное расположение и характер источника сохраняется в течение всего года*). Такое расположение и такие свойства источника не только правильно дают амплитуды вариаций различных компонент на разных широтах, но и единым образом объясняют разброс моментов максимума суточного эффекта для 10 различных эффектов, для которых непосредственно наблюдаемые моменты максимума различаются в пределах до четырёх часов (см. табл. II). Это значит, что без такого анализа можно было бы ожидать, что вычисленные по разным компонентам положения источника вариаций будут разбросаны в пределах порядка $4 \times 15 = 60^\circ$.

Таким образом, совершенно ясно, что существуют, по крайней мере, два различных источника вариаций внеземного происхождения.

§ 7. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ

Описанные выше свойства источника суточных вариаций определённо подтверждают гипотезу о том, что причиной этих вариаций являются корпускулярные потоки, испускаемые Солнцем. Найденный спектр суточных вариаций сразу позволяет отвергнуть ряд других

*) Здесь поэтому существен отмеченный выше факт постоянства суточного эффекта в течение года, обнаруживаемый, когда правильно исключён атмосферный эффект (см. рис. 5).

гипотез, например, предположения о том, что здесь играет роль азимутальный эффект в магнитном поле Солнца ³⁷, или прямой приход частиц испущенных Солнцем ³⁸ и т. п.

Как отмечалось уже ранее ⁴, причины, рассматривавшиеся в ³⁷, сказывались бы особенно сильно на области малых энергий. Между тем спектр (6) показывает, что как раз в этой области суточных вариаций нет. Найденное расположение источника показывает, что дополнительные частицы идут не из Солнца. Вместе с тем требуется объяснить, почему поток как раз наиболее мягких частиц, $\epsilon < 7 \text{ Бэв}$, не испытывает суточных изменений. Из схемы рис. 11, а, показывающей как влияет на космические лучи прохождение через потоки, в которых имеются магнитные поля, видно, что, действительно, мягкие частицы, отражаемые потоком, не вносят изменений в интенсивность: вследствие изотропии космических лучей два типа рассеяний всегда точно взаимно компенсируются.

Более быстрые частицы, идущие слева, ускоряются, а идущие справа — замедляются, если магнитное поле в потоке направлено так же, как земное магнитное поле. Замедление частиц, идущих справа под углом φ с осью Земля—Солнце, эквивалентно появлению дополнительного источника слева под углом $\pi - \varphi$ (рис. 11, б). Вместе с дополнительным источником, который обусловлен ускорением частиц, идущих слева под углом φ , он дает эффективный суммарный дополнительный поток космических лучей (после суммирования по всем потокам и всем φ !), направленный примерно под углом 90° к линии Земля—Солнце, что и требует эксперимент.

Простое дифференцирование показывает, что изменение спектра $D(\epsilon) \sim \epsilon^{-(\gamma+1)}$ вследствие ускорения, вызванного пересечением одного потока, равно ⁴

$$\delta D(\epsilon) \sim (\gamma + 1) \frac{\delta \epsilon}{\epsilon} D(\epsilon), \quad (8)$$

где $\delta \epsilon = \pm 300Hl \frac{u}{c}$. Здесь l — ширина корпускулярного потока, u — его скорость. С другой стороны, рассеяние в потоке ставит границу

$$\epsilon_{\text{крит}}^{(1)} \approx 300Hl. \quad (9)$$

Сравнивая с результатами обработки эксперимента (6), видим, что по $\epsilon_{\text{крит}}^{(1)} \approx 7 \text{ Бэв}$ и a можно определить две характеристики потоков: H и nl , где n — среднее число потоков, одновременно исходящих из Солнца. Знак магнитного поля получаем, учитывая, что первичные космические лучи состоят из положительно заряженных частиц. Далее, взяв из независимых наблюдений (например, из средней длительности магнитной бури, а также по ряду других соображений, см. ⁴⁰, стр. 225) $l \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}$ (что соответствует угловой ширине потока $\delta \approx 8^\circ$), получим из (9):

$$H = \frac{\epsilon_{\text{крит}}^{(1)}}{300l} \sim 10^{-5} \text{ эрстед} \quad (10)$$

Солнечно-суточные вари

Тип регистрируемой компоненты	Ампли			
	$\lambda = 0^\circ$		$\lambda = 50^\circ$	
	расч.*)	эксп.	расч.	эксп.
Ионизирующая компонента на границе атмосферы	0,69	нет данных	0,41	1÷2
Ионизирующая компонента на уровне гор	0,35	$0,3 \pm 0,1^{***}$	0,49	нет данных
Нейтронная компонента на уровне моря	0,41	$0,43 \pm 0,1$	0,58	$0,6 \pm 0,1$
Жёсткая компонента **) на уровне моря	0,33	$0,3 \pm 0,1$	0,30	$0,3 \pm 0,1$
Жёсткая компонента на глубине 60 м в. э.	0,06	нет данных	0,03	$0,05 \pm 0,02$
Жёсткая компонента **) на уровне моря {	32°	с юга	0,3	$0,3 \pm 0,1$
	32°	с севера	0,3	$0,3 \pm 0,1$

*) В графе «расч.» приведены значения амплитуды и фазы максимума, источников дополнительного излучения, указанных в тексте.

**) В приведённых экспериментальных данных по жёсткой компоненте учёт метеорологических факторов невозможен, поскольку не были

***) Данные относятся к жёсткой компоненте на уровне гор.

Таблица II

ации космических лучей

туда %		Время максимума (местное). Часы					
$\lambda = 80^\circ$		$\lambda = 0^\circ$		$\lambda = 50^\circ$		$\lambda = 80^\circ$	
расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
0,11	нет данных	11,3	нет данных	15,2	нет данных	16,4	нет данных
0,13	нет данных	12,8	$13 \pm 0,5$	15,1	нет данных	16,3	нет данных
0,13	нет данных	11,4	12 ± 1	14,5	$14 \pm 0,5$	16,1	нет данных
0,09	$0,1 \pm 0,03$	13,3	$13 \pm 0,5$	14,9	$15 \pm 0,5$	15,9	16 ± 1
0,01	нет данных	16,0	нет данных	16,5	16 ± 1	16,8	нет данных
—	—	—	—	15,9	$16 \pm 0,5$	—	—
—	—	—	—	13,4	$13 \pm 0,5$	—	—

которые рассчитываются на основе спектра энергий и места расположения

те приближённо исключено влияние метеорологических факторов ³¹. (Точ-опубликованы соответствующие данные радиозондирования атмосферы.)

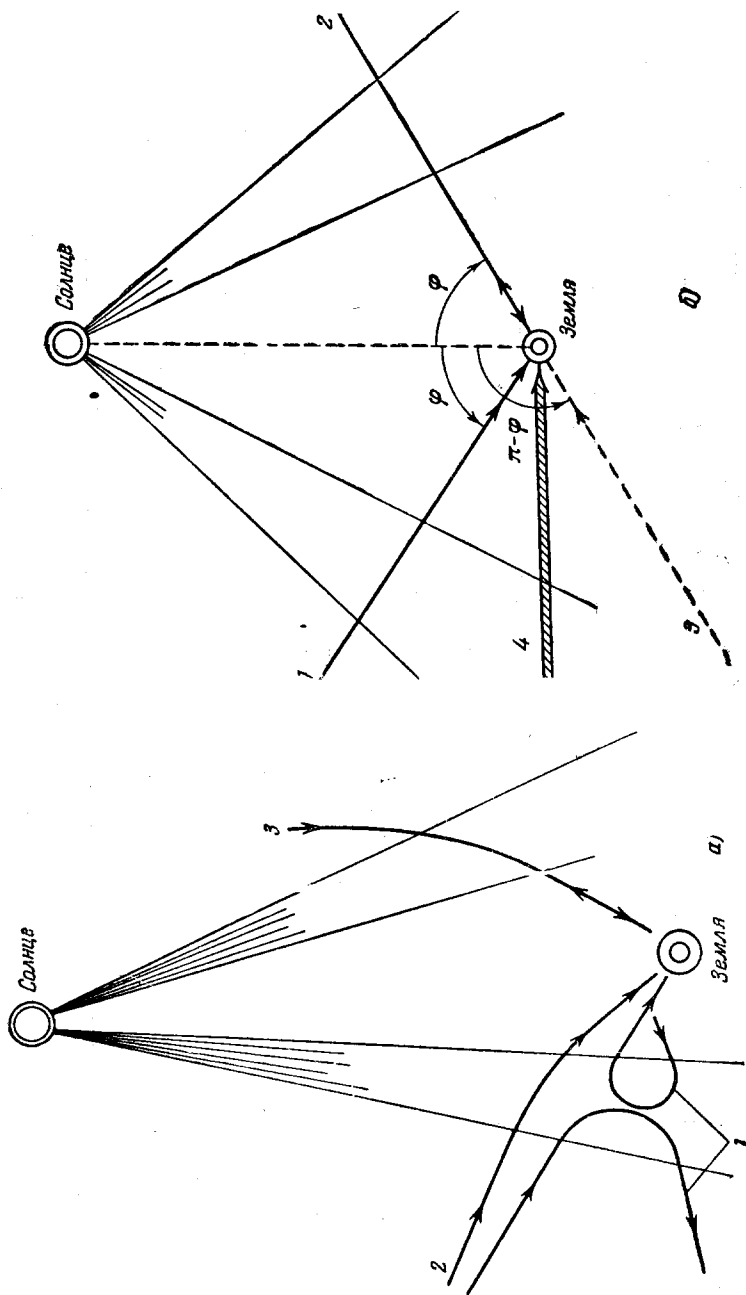


Рис. 11. Создание суточных вариаций космических лучей потоками, несущими замороженные магнитные поля. *а* — схема механизма: 1 — частицы малой энергии, $\varepsilon < \varepsilon_{\text{крит}}$, рассеиваются, интенсивность их на Земле не меняется; 2 — частицы высокой энергии ускоряются; поток их возрастает; 3 — частицы высоких энергий, замедляются, поток их уменьшается; 4 — создание дополнительного эффективного источника космических лучей и его расположение: 1 — ускорение; 2 — замедление; 3 — дополнительный поток, которым можно заменить замедление справа; 4 — средний суммарный эффективный механизм.

Столь большое значение H указывает, что это не может быть общее поле Солнца (на земной орбите по последним измерениям ⁴¹ оно не может, во всяком случае, превосходить величины $\sim 10^{-7}$ эрстед), но должно быть «замороженное» в потоке поле той области Солнца, где поток возник, ослабленное вследствие расширения потока *). Не входя в дальнейшие обсуждения этого вопроса (см. ³¹), мы можем лишь подчеркнуть, что здесь появляется новая, независимая от используемых в астрофизике, возможность изучения условий на Солнце и вблизи него. Сказанным эти возможности не ограничиваются. Действительно, сравнение величины $(1 + \gamma)\delta a$ (нужно только проинтегрировать по углам прихода частиц и по всем n одновременно присутствующим потокам, в среднем располагающимся аксиально симметрично ³¹) с экспериментально определенной величиной a (см. формулу (6)) позволяет, например, взяв в согласии с другими определениями $u \approx 10^8$ см/сек, определить среднее число потоков n . Оказалось, что $n \sim 5 \div 10$. Здесь, однако, открывается дополнительная возможность.

Величина a даёт результат усреднения по многим потокам. Кроме того, как упоминалось, она несколько различна для разных широт на Земле. Это различие обусловлено тем, что на более высокие широты частицы космических лучей приходят не в плоскости эклиптики, а под значительным углом Φ к ней. Если, например, при данном Φ на пути частиц встретилось меньше солнечных потоков, чем при другом Φ , то это отражает распределение потоков по поверхности Солнца.

Действительно, некоторыми астрофизиками (см., например, ⁴⁰) высказывалось мнение, что наиболее многочисленная группа солнечных корпускулярных потоков связана с высокоширотными образованиями на Солнце.

Хотя в настоящее время экспериментальные данные относительно вариаций космических лучей и соответственно относительно значений a ещё не очень точны, мы можем попробовать построить экспериментальную кривую, дающую зависимость a от угла Φ (рис. 12, *a*). Затем кривую можно пересчитать так, чтобы она давала зависимость числа испускаемых потоков от гелиошироты Δ . Для этого нужно лишь сделать предположение об угловой ширине потоков δ . Для разных δ получаем кривые рис. 12, *б*, показывающие, что эти потоки скорее всего действительно являются высокоширотными образованиями.

Разумеется, современный эксперимент очень грубо даёт значения a , и мы приводим эту кривую, с одной стороны, чтобы показать

*) Наличие «замороженных» магнитных полей в корпускулярных потоках с необходимостью следует из уравнений магнитной гидродинамики (см., например, ⁴). Гипотезы о таком «замораживании» поля в потоках широко обсуждались в литературе (см., например, ³⁹).

внутреннюю непротиворечивость теории, с другой — чтобы проиллюстрировать возможности, которые открываются перед изучением

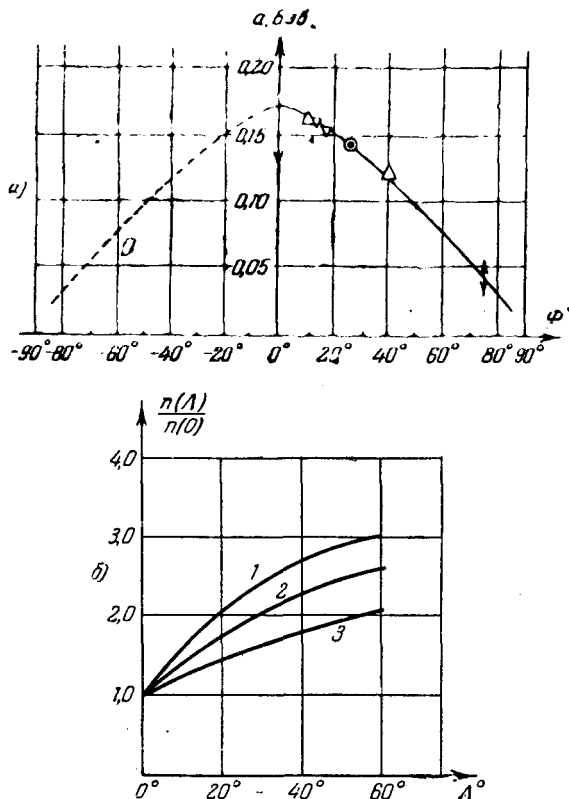


Рис. 12. Гелиоширотное распределение потоков, вызывающих суточные вариации космических лучей.

a — зависимость амплитуды первичных суточных вариаций a от угла Φ движения частиц с плоскостью эклиптики. b — рассчитанное по кривой рис. 12, a относительное число потоков $\frac{n(\Lambda)}{n(0)}$ как функция гелиошироты Λ места испускания их при различных предположениях об угловой ширине потоков δ : 1 — кривая — $\delta = 8^\circ$; 2 — кривая — $\delta = 15^\circ$; 3 — кривая — $\delta = 30^\circ$.

гелиофизических проблем при использовании данных по вариациям космических лучей.

§ 8. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВАРИАЦИЙ, КОРРЕЛИРУЮЩИХ С МАГНИТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Влияние солнечных потсков сказывается не только на суточных вариациях. Оно проявляется также на изменениях (падении) интенсивности космических лучей во время некоторых магнитных

бурь. Мы уже упоминали, что по какой-то причине в некоторых случаях даже во время сильных магнитных бурь космические лучи не испытывают изменений. Подробный анализ влияния потоков, захватывающих Землю и поэтому вызывающих магнитные бури, на космические лучи ³¹ не может быть здесь изложен. Мы отметим только некоторые особенности, показывающие возможности метода.

Как показывает схема рис. 13, здесь во время магнитных бурь главную роль играет рассеяние медленных частиц космических лучей потоком, не пускающим их на Землю. Именно поэтому интенсивность космических лучей во время бури всегда падает. Но для этого поле в потоке, точнее произведение HI , должно быть значительно. Из вариаций космических лучей можно найти эту величину.

Действительно, согласно схеме рассеяния, изображённой на рис. 13, можно рассчитать $\frac{\delta D}{D}$ при различных предположениях о величине HI . Подставляя найденные $\frac{\delta D}{D}$ в (3), можно с помощью коэффициентов связи, изображённых на рис. 10, рассчитать ожидаемые во время попадания потока на Землю уменьшения интенсивности различных компонент космических лучей на разных широтах. Сравнение результатов подобного подсчёта с экспериментальными данными позволяет определить HI . Так, например, уменьшения интенсивности различных компонент космических лучей на разных геомагнитных широтах, которое наблюдалось во время магнитной бури, последовавшей после большой солнечной вспышки 25 июля 1946 г., непротиворечивым образом объясняется рассмотренным механизмом рассеяния, если предположить, что напряжённость «замороженного» в потоке магнитного поля $H \sim 2 \cdot 10^{-4}$ эрстед около Земли (при ширине потока, равной $2 \cdot 10^{12}$ см)*).

Подобным же механизмом можно объяснить ³¹ 11-летние вариации космических лучей, связанные с 11-летним циклом солнечной активности, в течение которого резко меняется число испускаемых из Солнца потоков; годовые (остающиеся после исключения метеорологического эффекта, см. рис. 9), обусловленные тем обстоятельством, что ось вращения Солнца не перпендикулярна к плоскости эклиптики, в результате чего гелиоширота Земли меняется в течение года (так называемый эффект Корти, см. ⁴⁰), и что ведёт к соответствующему изменению числа потоков, попадающих на Землю (см. рис. 9, из которого видно, что интенсивность космических

*) Отметим, что различные обсуждавшиеся в литературе гипотезы относительно механизма изменения интенсивности космических лучей во время магнитных бурь, как показывает подобное детальное сравнение с опытом, противоречат экспериментальным данным. Это относится к гипотезе Чепмена ⁴⁸ (влияние экваториального токового кольца вокруг Земли на космические лучи), к гипотезе Альфвена ⁴ (стр. 261 — влияние электрического поля потоков на космические лучи) и т. п.

лучей хорошо коррелирует с магнитной активностью) и, наконец, 27-дневную тенденцию повторяемости космических лучей, которая обуславливается потоками, испускаемыми из Солнца в течение нескольких его оборотов, так что через каждые 27 дней (время оборота Солнца) попадание потоков на Землю повторяется.

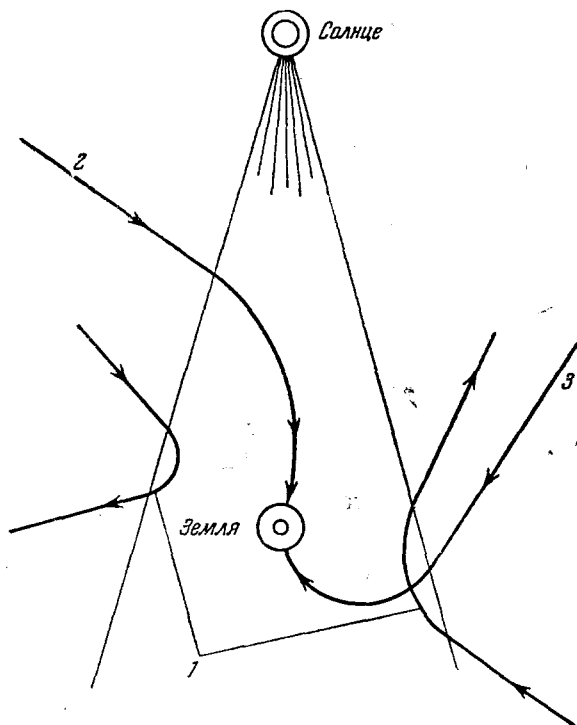


Рис. 13. Эффекты космических лучей во время попадания корпускулярных потоков на Землю (схема). 1 — частицы сравнительно небольшой энергии рассеиваются; их интенсивность на Земле уменьшается; 2 — частицы высоких энергий ускоряющиеся (изменение сказывается на Земле в утренние часы); 3 — частицы высоких энергий замедляющиеся (изменение сказывается на Земле в ночные и вечерние часы).

Из рис. 13 видно, что при попадании потоков на Землю кроме рассеяния частиц должно иметь место также ускорение и торможение частиц больших энергий, приходящих соответственно слева и справа от линии Земля — Солнце. Это должно привести к появлению дополнительных суточных вариаций с временем максимума, смещённым по сравнению с обычными суточными вариациями к утренним часам (из-за дополнительного отклонения частиц космических лучей в магнитном поле потока). Этот эффект действи-

тельно наблюдается, что видно, например, из рис. 14²⁸. Так как амплитуда дополнительных суточных вариаций определяется величиной uH , а величина уменьшения интенсивности во время бури — величиной IH , то возникает принципиальная возможность определения из данных по космическим лучам скорость u корпускулярного потока вблизи Земли. Так, например, скорость около Земли, определённая таким образом для потока, связанного с солнечной

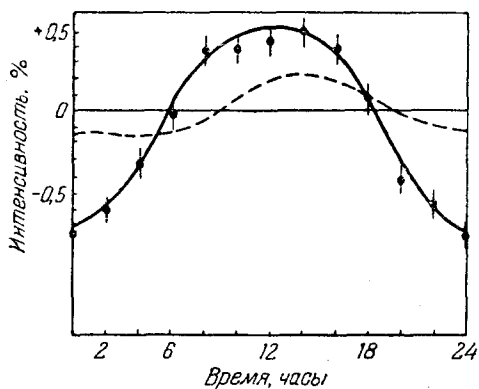


Рис. 14. Изменение суточных вариаций жёсткой компоненты космических лучей во время магнитных бурь. Пунктир — средняя за год суточная вариация, сплошная кривая — суточная вариация, средняя для двух очень больших магнитных бурь, которые имели место в июле 1946 г. и в январе 1949 г.

вспышкой 25 июля 1946 г., оказалась $u \geq 10^8$ см/сек, что находится в удовлетворительном (если учесть грубость оценок) согласии со средней скоростью $u \approx 1,6 \cdot 10^8$ см, определённой из времени запаздывания начала магнитной бури относительно начала солнечной вспышки.

Легко видеть, что из-за появления во время попадания потоков на Землю дополнительных суточных вариаций указанного свойства должны наблюдаться также соответствующие 11-летние, годовые и 27-дневные изменения амплитуды и фазы суточного эффекта космических лучей. Последние действительно были обнаружены экспериментально⁴⁴. Что же касается годовых изменений суточного эффекта, то для их обнаружения необходимо тщательное исключение влияния метеорологических факторов, лимитируемое в настоящее время точностью измерения температурного разреза атмосферы. 11-летние изменения суточного эффекта также были недавно установлены^{42, 45}, хотя их было довольно трудно обнаружить на фоне больших «вековых» смещений времени максимума суточных вариаций (с периодом, повидимому, около 22—23 лет^{45, 46}), обусловленных,

видимо, совершенно другой причиной. Такой причиной могло бы быть, например, изменение направления замороженного поля в слабых потоках (несущих поля с $H \sim 10^{-5}$ эрстед)^{*} ³¹. Такой причиной могли бы быть также солнечные корпускулярные потоки, не попадающие на Землю и несущие поля, параллельные плоскости эклиптики (потоки 2 рода ³, связанные с солнечными пятнами).

Далее нужно подчеркнуть, что для возникновения магнитной бури требуется, чтобы поток содержал достаточно большое число частиц, магнитное же поле в потоке несущественно, а ширина потока влияет только на длительность бури.

Поэтому плотный поток со слабым магнитным полем вызовет сильную магнитную бурю, но не скажется на космических лучах.

Этим объясняется, почему не всегда даже сильная магнитная буря сопровождается возмущением космических лучей (такова, например, магнитная буря 21 августа 1937 г. ²⁸). Однако в среднем, как показывает статистический анализ ⁴⁷, заметное уменьшение интенсивности космических лучей вызывают 88% очень больших магнитных бурь и лишь 8% умеренных (не говоря уже о слабых). Из этого следует, что потоки, вызывающие очень большие магнитные бури, должны в среднем нести большие магнитные поля, а вызывающие слабые бури — соответственно слабые поля.

Это может быть связано с тем обстоятельством, что в ионизированном корпускулярном потоке, обладающем высокой проводимостью, должно выполняться определенное соотношение между энергией «замороженного» магнитного поля и энергией турбулентного движения в потоке. Из этого соотношения следует, что плотность потока должна удовлетворять неравенству

$$\rho \geq \frac{2H^2}{v^2 \cdot 8\pi}, \quad (11)$$

где v — средняя скорость турбулентных движений. Действительно, полагая в (11) $v \sim 10^6$ см/сек, получим для слабых потоков ($H \sim 10^{-5}$ эрстед), $\rho \geq 3$ корпускул/см³, а для сильных ($H \sim 2 \times 10^{-4}$ эрстед) — $\rho \geq 10^3$ корпускул/см³.

Интересно, что астрофизиками также высказывалось предположение ⁴⁰ о существовании двух типов потоков, генетически связанных с различными процессами на Солнце. Одни из них коррелируют с солнечными пятнами и другими низкоширотными образованиями на Солнце (их можно называть потоками второго рода по терминологии ^{30, 31}) и несут, как мы можем предположить теперь, сильные магнитные поля с напряжённостью около Земли $\sim 2 \cdot 10^{-4}$

^{*}) Не исключено, что такое изменение направления поля могло бы появиться, если бы общее магнитное поле Солнца меняло знак, как это иногда предполагают ³¹.

эрстед. Другие коррелируют с высокоширотными образованиями и при попадании их на Землю вызывают лишь слабые геомагнитные возмущения («потoki первого рода»). Они несут слабые магнитные поля с напряженностью около Земли $\sim 10^{-5}$ эрстед и являются основной причиной спокойных солнечно-суточных вариаций космических лучей.

Космические лучи и здесь открывают новые возможности количественного изучения этих потоков.

Рассмотренный механизм влияния корпускулярных потоков на космические лучи может объяснить, повидимому, и наличие плато широтного эффекта космических лучей на больших высотах. Предполагалось, что это явление связано с рассеянием космических

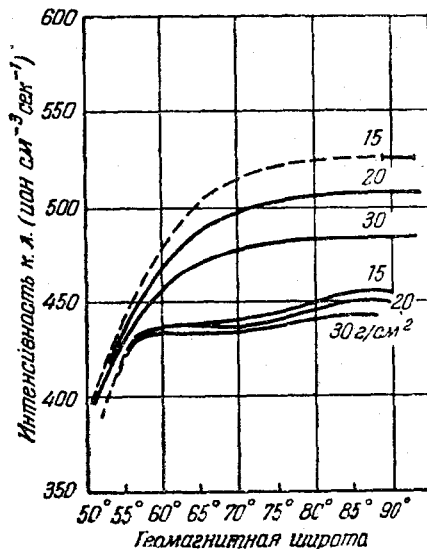


Рис. 15. Изменение широтного эффекта общей ионизирующей компоненты на больших высотах в атмосфере на уровнях с давлением 15, 20 и 30 г/см^2 от лета 1951 г. (нижние три кривые) к лету 1954 г. (верхние три кривые).

лучей малой энергии общим магнитным полем Солнца или некоторым межпланетным магнитным полем солнечной системы⁴⁸. Подобную же роль могут играть и магнитные поля, «замороженные» в корпускулярных потоках^{30, 31}. Однако в этом случае рассеяние частиц не будет стабильным, и на больших широтах возможны значительные временные флуктуации потока космических лучей малой энергии (что действительно наблюдается экспериментально⁴⁹). Кроме того, если этот механизм образования плато является

основным*), то уменьшение числа солнечных потоков (в период падения солнечной активности) должно вызывать смещение «колена» широтного эффекта на больших высотах к высоким широтам и соответствующее возрастание интенсивности космических лучей. Это в последнее время и было замечено экспериментально в работе⁵⁰, где показано, что «колено» широтного эффекта на больших высотах действительно сместилось с 58° в 1951 г. до 68° в 1954 г. (рис. 15)**)

§ 9. ВАРИАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ХРОМОСФЕРНЫМИ ВСПЫШКАМИ НА СОЛНЦЕ

Наконец, следует обратиться к вариациям, связанным с хромосферными вспышками на Солнце. Они ясно показывают (см. формулу (7)), что Солнце генерирует космические лучи, по крайней мере в диапазоне энергий $\epsilon < \epsilon_{\text{крит}}^{(2)} \sim 10-12 \text{ Бэв}$.

Некоторые характеристики возрастных изменений интенсивности во время вспышек, получаемые из экспериментальных данных путём довольно кропотливого анализа (мы здесь не можем на нём останавливаться, см.³¹), показывают, что возникновение космических лучей на Солнце может быть в настоящее время непротиворечиво объяснено статистическим механизмом Ферми⁵², если его применить, как предложил В. Л. Гинзбург⁵³, к условиям оболочки Солнца (В. Л. Гинзбург развил эти представления особенно подробно для оболочечных и сверхновых). При этом требуется³¹, чтобы во время больших хромосферных извержений имелись образования размером $\sim 2 \cdot 10^7 \text{ см}$, движущиеся со скоростями $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ и несущие «замороженные» магнитные поля с напряжённостью не меньше 2 эрстед. Если подобные хромосферные образования занимают объём, больший 0,02—0,002 всего объёма источника (с размерами $\sim 10^{10} \text{ см}$, расположенного в верхней части хромосферы и в короне), то кинетической энергии их турбулентного движения оказывается достаточно для создания необходимого добавочного потока частиц (всего во время вспышки 19 ноября 1949 г. было испущено из Солнца $\sim 10^{32}$ частиц космических лучей в энергетическом интервале 1,5—12 Бэв).

*) Не исключено, что в создании подобного эффекта большую роль могут играть и потоки 1 рода, несущие слабые поля, которые вместе с потоками 2 рода могут «питать» некоторое общее межпланетное магнитное поле, рассеивающее частицы малых энергий и не допускающее их в солнечную систему (на это обстоятельство любезно указал нам проф. В. Л. Гинзбург). Напряжённость поля будет при этом меняться с циклом солнечной активности (повидимому, с некоторым запаздыванием), и подобный механизм также мог бы объяснить обсуждаемый эффект. Возможно, что такого рода механизм играет роль и в создании 11-летних вариаций космических лучей.

**) Подобное смещение было обнаружено также для нейтронной компоненты на высоте 310 г/см^2 ⁵¹.

Во время малых солнечных вспышек также происходит испускание космических лучей малой энергии из Солнца (при этом поток частиц на 2—3 порядка меньше, чем во время больших вспышек). Учёт всех больших и малых вспышек даёт для среднего потока генерируемых Солнцем частиц величину $\sim 10^{24}$ частиц·сек⁻¹. Такая малая величина потока частиц делает гипотезу солнечного или звёздного происхождения космического излучения нереальной⁵³.

Правда, можно было бы предположить, что все эти частицы запутываются в каких-то магнитных полях вблизи Солнца. Однако, во время вспышек частицы попадают на Землю из Солнца, почти не отклоняясь. Это значит, что магнитные поля очень слабы и объём, в котором происходит накапливание, должен быть чрезвычайно велик. Это же сходится с рядом других оценок⁵⁵.

Если Солнце обладает даже незначительным общим магнитным полем (с напряжённостью ~ 1 эрстед на полюсах⁴¹), то для выхода частиц с энергией в несколько Бэв необходимы некоторые специальные условия (в противном случае частицы, закручиваясь под действием этого поля, вернутся на Солнце).

Таким условием, в частности, может быть образование «туннеля» в области запрещённых направлений в поле солнечного диполя из-за возмущения этого поля локальными полями (например, полями пятен⁵⁴). Выход сравнительно небольшой доли генерированных частиц из Солнца возможен также благодаря «запутыванию» их «замороженными» магнитными полями корпускулярных потоков и выбрасыванию этих частиц вместе с потоками на значительные расстояния от Солнца⁵¹. Не исключено, что большое различие в потоках генерированных частиц во время больших и малых вспышек (на два-три порядка) объясняется не только различием в условиях генерации, но и различиями в условиях выхода частиц из Солнца*).

*) После того, как настоящая статья была написана, произошла грандиозная вспышка на Солнце 23 февраля 1956 г. Хромосферное извержение, как всегда сопровождающееся возрастанием ультрафиолетового излучения, вызвало сильнейшее возмущение в ионосфере, в результате чего дальняя радиосвязь на коротких волнах была прервана на несколько часов. Одновременно небывало возросла и интенсивность космических лучей. На небольшой высоте над уровнем моря, в Москве и в Свердловске, попавших в зону максимума (по долготе), почти мгновенное возрастание интенсивности μ -мезонной компоненты составило $\sim 400\%$, затем превышение над средним уровнем начало экспоненциально убывать и через 2 часа составляло только 20%. Магнитное поле Земли мешает частицам сравнительно малых энергий попасть на экватор. В соответствии с этим в Тбилиси возрастание составило только около 100% ÷ 200%. Таким же было возрастание и в Якутске, лежащем хотя и на севере, но слишком далеко от «освещаемой» солнечными космическими лучами в момент вспышки части поверхности Земли. Анализ, подобный тому, который для вспышки 19 ноября 1949 г. привёл к формуле (7), показал, что спектр новой вспышки имеет такой же характер, но абсолютная величина возраста-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы дали здесь, конечно, лишь весьма краткое изложение состояния вопроса о происхождении вариаций космических лучей.

Резюмируя, нужно ещё раз подчеркнуть, что в настоящее время, во-первых, достигнута возможность последовательно исключать влияние метеорологических изменений в земной атмосфере (§ 3). Во-вторых, развит метод, позволяющий при наличии достаточно подробных экспериментальных данных о вариациях разных компонент выводить на их основании истинные вариации в первичном спектре космических лучей, падающих на атмосферу (§ 5). В-третьих, уже наличные экспериментальные данные позволяют таким путём определить, хотя бы грубо, энергетический спектр космических лучей, дополнительно приходящих на Землю во время суточных вариаций и во время вариаций, связанных с хромосферными вспышками на Солнце (§ 5). Далее оказывается возможным определить расположение этих источников относительно Земли (§ 6). Другими словами, определяются важные характеристики источников вариаций. Это позволяет отвести ряд предлагавшихся для объяснения вариаций гипотез.

В результате исследования оказывается, что все наблюдавшиеся до сих пор вариации можно приписать трём механизмам (см. табл. I).

- 1) Влиянию изменений состояния атмосферы;
- 2) Влиянию ускорения, замедления и рассеяния космических лучей в корпускулярных потоках, испускаемых Солнцем;
- 3) Испусканию космических лучей Солнцем во время больших и малых солнечных вспышек.

Возможно, что существуют, кроме того, вариации космических лучей, связанные с диффузией космических лучей из Галактики, однако, если они и существуют, то они пока ещё лежат за пределами точности современных методов регистрации.

Мы пытались показать, что изучение суточных вариаций, изменений интенсивности во время магнитных бурь и некоторых других вариаций космических лучей даёт новый, независимый метод

ния теперь была в 10 раз больше. Это значит, что на границе атмосферы первичное излучение в момент вспышки превышало средний уровень примерно в 100 раз. Однако всё это возрастание приходилось на область сравнительно малых энергий, и потому на уровне моря избыточное излучение, перешедшее в способные дойти сюда μ -мезоны (их могут давать только первичные частицы с энергией не ниже ~ 7 Бэв, см. рис. 5 и соответствующие пояснения в тексте), лишь в 4—5 раз превышало средний уровень. Заметим, что нейтронная компонента, более непосредственно отражающая изменение интенсивности первичного излучения (сама по себе на уровне моря необычайно слабая), возросла гораздо сильнее, в Швеции, например, в 50 раз. Подробная обработка по изложенной здесь методике показала, что известные в настоящее время характеристики вспышки 23 февраля 1956 г. согласуются с выводами о природе таких вспышек, делаемыми в настоящей статье.

количественного исследования свойств корпускулярных потоков, испускаемых Солнцем, распределения их источников по поверхности Солнца и т. п. Изучение вариаций, связанных с солнечными вспышками, даёт также независимые возможности изучения некоторых условий в хромосфере Солнца. Уже сейчас можно определить ряд количественных характеристик потоков. Те из них, которые могут быть найдены и другими астрофизическими и гелиофизическими методами, получают в согласии с этими определениями.

Соображения, изложенные в § 5, подсказывают, какие именно вариации и каких именно компонент космических лучей нужно изучать в первую очередь, чтобы повысить надёжность и точность описанных результатов и получить новые результаты. Соответствующие рекомендации позволяют целесообразнее планировать изучение вариаций в период Международного геофизического года (июль 1957 — декабрь 1958).

Мы не касались здесь многих вопросов, например объяснения таких вариаций, как полусуточные, влияния солнечных вспышек на суточные вариации и т. п.

Соответствующий анализ этих вариаций, а также более подробное рассмотрение некоторых других из затронутых вопросов могут быть найдены в другом месте³¹.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Мысовский, Л. Тувим, *Zeits. f. Phys.* **39**, 146 (1926).
2. P. M. Blacket, *Phys. Rev.* **54**, 973 (1938).
3. J. A. Simpson, W. H. Fonger, S. B. Treiman, *Phys. Rev.* **90**, 934 (1953).
4. Х. Альфвен, *Космическая электродинамика*, ИЛ, Москва, 1952.
5. С. Б. Пикельнер, *УФН* **58**, 285 (1956).
6. S. E. Forbush, *Phys. Rev.* **54**, 979 (1938).
7. S. E. Forbush, *Rev. Mod. Phys.* **11**, 168 (1939).
8. A. Duperier, *Proc. Roy. Soc.* **62A**, 684 (1949).
9. A. Duperier, *J. Atm. Terr. Phys.* **1**, 296 (1951).
10. D. W. H. Doi bear, H. Elliot, *J. Atm. Terr. Phys.* **1**, 215 (1951).
11. Е. Л. Фейнберг, *ДАН СССР* **53**, 421 (1946).
12. Л. И. Дорман, *ДАН СССР* **94**, 433 (1954).
13. Л. И. Дорман, А. И. Кузьмин, Г. В. Тянутова, Е. Л. Фейнберг, Ю. Г. Шафер, *ЖЭТФ* **26**, 537 (1954). (Доложено на Первом Всесоюзном совещании по физике космических лучей, Москва, май, 1952 г.)
14. Вариации интенсивности космических лучей, Труды Якутского филиала АН СССР, серия физическая, вып. 1, Изд. АН СССР, М., 1955.
15. А. И. Кузьмин, *ЖЭТФ* **28**, 616 (1955).
16. Е. С. Глокова, *Изв. АН СССР, серия физическая*, **20**, 47 (1956). (Доложено на 3-м совещании по физике космических лучей, Москва, декабрь, 1954.)
17. W. Kolhörster, *Phys. Zeits.* **42**, 55 (1941).
18. H. Alfven, R. G. Malmfors, *Ark. Mat.-Fys.* **29A**, № 24 (1943).
19. H. Elliot, D. W. H. Doi bear, *Proc. Phys. Soc.* **63**, 137 (1950).
20. S. Olbert, *Phys. Rev.* **92**, 454 (1953).

21. K. Maeda, M. Wada, J. of Scient. Res. Inst. **48**, 71 (1954).
22. Л. И. Дорман, ДАН СССР **95**, 49 (1954).
23. K. M. Kupferberg, Phys. Rev. **73**, 804 (1948).
24. Л. И. Дорман, ЖЭТФ **26**, 504 (1954).
25. С. Н. Вернов, А. М. Куликов, А. Н. Чарахъян, Изв. АН СССР, серия физическая **17**, 13 (1953).
26. D. H. Loughridge, P. Gast, Phys. Rev. **58**, 583 (1940).
27. Д. Д. Красильников, ЖЭТФ **28**, 610 (1955).
28. Г. Эллиот, Физика космических лучей (под ред. Дж. Вильсона), глава VIII, ИЛ, Москва (1954).
29. H. Elliot, D. W. H. Doibear, J. Atm. Terr. Phys. **1**, 205 (1951).
30. Л. И. Дорман, Изв. АН СССР, серия физическая **20**, 24 (1956). (Доложено на 3-м совещании по физике космических лучей, Москва, декабрь, 1954 г.)
31. Л. И. Дорман, Диссертация, НИИЗМ — ФИАН, Москва (1955).
32. Г. Низр, Физика космических лучей, I (под ред. Дж. Вильсона), глава V, ИЛ, Москва (1954).
33. W. H. Fonger, Phys. Rev. **91**, 351 (1953).
34. J. Firor, Phys. Rev. **94**, 1017 (1954).
35. K. G. Malmfors, Ark. Mat.-Astr.-Fys. **32A**, № 8 (1945).
36. E. A. Brunberg, Tellus **5**, 135 (1953); E. A. Brunberg, A. Dattner, Tellus **5**, 269 (1953).
37. L. Janossy, Zeits. f. Phys. **104**, 430 (1937); K. Dwight, Phys. Rev. **78**, 40 (1950).
38. V. Sarabhai, R. P. Kane, Proc. Ind. Acad. Sci. **A37**, 287 (1953); Phys. Rev. **90**, 204; **91**, 688; **92**, 415 (1953).
39. К. О. Kippenheuer, Zeits. Astroph. **10**, 260 (1935).
40. М. С. Эйгенсон, М. Н. Гневышев, А. И. Ольи и Б. М. Рубашев, Солнечная активность и её земные проявления, ГИТТЛ, М. — Л. (1948); К. О. Kippenheuer, Astrophys. J. **105**, 408 (1947).
41. H. W. Babcock, Astr. J. **117**, 387 (1953); H. W. Babcock, T. G. Cowling, Monthly Not. R. A. S. **113**, 353 (1953).
42. Sarabhai, V. D. Desai, D. Kenkatesan. Phys. Rev. **96**, 460 (1954).
43. S. Chapman, Nature **140**, 423 (1937).
44. S. Ioshida, I. Kondo, J. Geomagn. a. Geoelectr. **6**, (1954).
45. Е. С. Глокова, Изв. АН СССР, серия физическая **17**, 136 (1953); •
46. T. Thambuyarhillai, H. Elliot, Nature **171**, 919 (1953); V Sarabhai, V. D. Desai, D. Venkatesan. Phys. Rev. **99**, 1490 (1955).
47. Е. С. Глокова, Труды НИИЗМ **8**, 59 (1952)
48. В. Л. Гинзбург, М. И. Фрадкин, ДАН СССР **92**, 531 (1953); В. Л. Гинзбург, Г. Г. Гетманцев, М. И. Фрадкин, Труды 3-го совещания по космогонии, стр. 149, Изд. АН СССР, Москва (1954).
49. R. A. Millikan, H. V. Neher, W. H. Pickering, Phys. Rev. **66**, 295 (1944); H. V. Neher, V. Z. Peterson, E. A. Stern, Phys. Rev. **90**, 655 (1953).
50. H. V. Neher, E. A. Stern, Phys. Rev. **98**, 845 (1955).
51. P. Meyer, J. A. Simpson, Phys. Rev. **99**, 1517 (1955).
52. E. Fermi, Phys. Rev. **75**, 1169 (1949).
53. В. Л. Гинзбург, ДАН СССР **92**, 727 (1953); УФН **51**, 343 (1953).
54. S. E. Forbush, P. S. Gill, M. S. Vallarta, Rev. Mod. Phys. **21**, 44 (1949).
55. B. Rossi. Nuovo Cimento. Supplemento № 1, 275 (1955).