

524.1+537.591.5

## КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

*Л. И. Дорман, И. Я. Либин*

### СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| 1. Введение . . . . .  | 403 |
| 2. Обнаружение периодичностей в космических лучах (методика исследований) . . . . .  | 405 |
| 3. Экспериментальные исследования флуктуаций космических лучей по результатам наземных наблюдений различных вторичных компонент космического излучения . . . . .               | 410 |
| а) Космофизические приборы для регистрации космических лучей . . . . .   | 410 |
| б) Флуктуационные явления в космических лучах по данным измерений различными космофизическими приборами . . . . .  | 412 |
| в) Флуктуации космических лучей во время форбуш-понижений интенсивности космического излучения на Земле и их корреляция с флуктуациями межпланетного магнитного поля . . . . . | 415 |
| г) Наблюдения флуктуаций космических лучей во время солнечных вспышек . . . . .  | 419 |
| 4. Экспериментальные исследования флуктуаций космических лучей на различных высотах в атмосфере, в околосолнечном и межпланетном пространстве . . . . .                        | 420 |
| 5. Происхождение флуктуаций космических лучей . . . . .  | 425 |
| 6. Теоретические исследования флуктуационных явлений в космических лучах и их возможной связи с процессами в межпланетной среде . . . . .                                      | 429 |
| 7. Заключение . . . . .  | 435 |
| Список литературы . . . . .  | 437 |

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Из-за высокой температуры и невысокого температурного градиента по высоте солнечная корона не находится в гидростатическом равновесии, а непрерывно расширяется в межпланетное пространство. Образующееся при этом истечение корональной плазмы известно как солнечный ветер. Присутствие магнитного поля приводит к образованию разного рода структур в солнечном ветре (неоднородности, разрывы, петли). Причем уже на небольших расстояниях от Солнца давление и инерциальные силы солнечного ветра становятся много больше сил, определяемых магнитным полем короны, и выносят это поле в межпланетное пространство, формируя тем самым межпланетное магнитное поле. На расстоянии порядка  $20r_{\odot}$  от Солнца расширение короны становится радиальным и конфигурация поля определяется вращением Солнца, которое закручивает силовые линии магнитного поля в спирали Архимеда, располагающиеся на конусах, описываемых вращением радиуса-вектора.

В работах<sup>1, 2</sup> приведены обзоры современных моделей солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, при этом поле предполагается «вмороженным» в плазму солнечного ветра (термин «вмороженность» означает, что время, требуемое для диффузии силовой линии магнитного поля на некое расстояние, много больше времени, необходимого для переноса силовой линии на то же расстояние в направлении движения солнечного ветра), спиральным или близким к спиральному, и врачающимся с периодом порядка периода вращения Солнца (27 суток).

Солнечный ветер и вмороженные в него магнитные поля проносятся мимо Земли со скоростью порядка  $300-700 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  и во многом определяют «погоду» в космическом пространстве в окрестностях нашей планеты: именно вариации солнечного ветра, взаимодействующего с магнитным полем Земли, являются главными причинами таких событий, как геомагнитные бури и все их проявления. В связи с этим систематические наблюдения солнечного ветра необходимы для понимания закономерностей геофизики и астрофизики. В частности, исследование турбулентности в солнечном ветре является одной из центральных задач современной астрофизики. Распространение ударных волн в турбулентной космической среде обуславливает многие физические процессы, в частности рассеяние и ускорение заряженных частиц космического излучения.

Одним из чувствительных зондов солнечного ветра являются космические лучи, позволяющие получать информацию не только о крупномасштабных процессах в солнечном ветре, но и о мелкомасштабной структуре солнечного ветра при изучении короткопериодических изменений (вариаций) интенсивности космических лучей на поверхности Земли, под землей, в атмосфере, стратосфере и непосредственно в космическом пространстве. Иерархия вариаций космических лучей достаточно сложна<sup>1</sup>: от вековых и 11-летних вариаций до иррегулярных с периодами в несколько минут, причем, как правило, удается достаточно четко (по крайней мере, для долгопериодных) идентифицировать источники вариаций различных типов. Что касается короткопериодических вариаций интенсивности космических лучей, то и наблюдения их, и идентификация источников являются делом чрезвычайно сложным; тем не менее все окапывается теми удивительными возможностями, которые сулят эти незначительные нерегулярные изменения интенсивности космического излучения. В современной научной литературе вместо термина «короткопериодические вариации» интенсивности космических лучей используются определения «флуктуации» или «спинтилляции» космических лучей, обозначающие быстрые (с периодами от нескольких минут до нескольких часов) изменения интенсивности регистрируемого космического излучения относительно средней фоновой интенсивности. При этом, естественно, для короткопериодических вариаций разной длительности величина фоновой интенсивности выбирается различной.

Впервые короткопериодические изменения интенсивности космических лучей были обнаружены М. Данжи и В. Сарабай в конце 60-х годов. И хотя сегодня их изучение прочно заняло свое место в космофизике, тем не менее во многих работах еще остается нерешенным главный вопрос: какова природа наблюдаемых флуктуаций космических лучей? Дело в том, что выделение и исследование этих короткопериодических изменений интенсивности космического излучения — дело сложное и трудоемкое: существовавшие до последнего времени методы изучения пространственно-временных изменений потока, спектра и состава космических лучей столкнулись со значительными трудностями при изучении их короткопериодических изменений (флуктуаций), поскольку для выделения флуктуаций, выяснения их природы пришлось, с одной стороны, оперировать процессами нестационарными, с непрерывно меняющимися амплитудой, фазой и частотой, и, с другой, — выявлять и изучать многочисленные корреляционные связи между самими флуктуациями и различными геофизическими, гелиофизическими и астрофизическими процессами. Обычные корреляционные методы оказались недостаточно информативными из-за малости используемых массивов данных (при больших массивах результаты смазывались, получаемая информация маскировалась — это существенно сказалось, в частности, на результате первых исследований). Поэтому начатое сравнительно недавно использование спектральных методов (хорошо известных в радиофизике) для выделения флуктуаций явилось поворотным пунктом в этой области космофизики. Применение спектральных методов позволило не только определить наличие в дан-

ных регистрации космических лучей колебаний с различными периодами (и оценить достоверность их выделения), но и провести качественные и количественные сопоставления различных процессов. Изучение динамики поведения флюктуаций космических лучей, рассмотрение их возникновения и развития в комплексе с различными геофизическими и гелиофизическими явлениями и их параметрами позволило выявить ряд любопытных закономерностей: резкое усиление амплитуды колебаний связано со вспышечными процессами на Солнце, структурой солнечного ветра, различного рода возмущениями в окрестностях Земли. Именно здесь выявились те богатейшие возможности для космофизики, скрытые в данных о короткопериодных изменениях космического излучения — возможности, позволяющие уже сегодня использовать флюктуации космических лучей как некий «сигнализатор» космических возмущений.

При распространении космических лучей в межпланетном пространстве возникает ряд флюктуационных явлений, связанных с рассеянием заряженных частиц на случайных неоднородностях межпланетного магнитного поля<sup>1-3</sup>. Имеющиеся в настоящее время в литературе данные позволяют сделать ряд достаточно общих выводов о природе и источниках флюктуаций космических лучей<sup>4</sup>:

- 1) флюктуации в ускорительных процессах;
- 2) флюктуации при распространении в солнечной короне и выходе из солнечной квазиловушки<sup>1</sup>;
- 3) флюктуационные процессы при распространении в межпланетном пространстве и в Галактике;
- 4) флюктуации при прохождении через магнитосферу Земли;
- 5) флюктуации, связанные с короткопериодными вариациями метеорологических факторов<sup>4,5</sup>.

Вклад каждого из указанных пяти источников реализуется при наблюдениях лишь в случае различных вторичных компонент космического излучения на Земле. При наблюдениях на низколетящих спутниках, геофизических ракетах, баллонах пятый источником можно полностью пренебречь, а при наблюдениях вне магнитосферы Земли существенными становятся только первые три источника флюктуаций. Следует отметить, что флюктуационные явления, вызываемые источниками 3—5) в галактических и солнечных космических лучах, идентичны; поэтому при детализации получаемых результатов большое значение имеет раздельная информация о флюктуациях каждого типа.

Для полного анализа факторов и процессов<sup>5-40</sup>, приводящих к образованию статистически значимых флюктуаций, точнее — к формированию и развитию статистически значимых флюктуаций, необходимо из всей поступающей информации о различных компонентах интенсивности космического излучения выделить по возможности все имеющиеся в ней периодичности, проследить их динамику развития, отбросить все несущественные явления и, наконец, связать (по возможности, аналитически) существенные процессы и явления. При этом определяющим является не только качество исходной информации, но и выбор методов анализа, проверка достоверности получаемых результатов в рамках той или иной физической модели.

## 2. ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ (МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ)

Существующие до настоящего времени методы изучения пространственно-временных изменений потока, спектра и состава космических лучей столкнулись со значительными трудностями при исследовании флюктуационных явлений в космических лучах<sup>41-43</sup>, поскольку для выделения этих флюктуаций, выяснения их природы пришлось, с одной стороны, оперировать нестационарными процессами с непрерывно меняющимися амплитудой, фазой.

и частотой и, с другой,— выявлять и изучать многочисленные корреляционные связи между самими флуктуациями и различными геофизическими, гелио-физическими и космофизическими процессами<sup>1</sup>. Обычные корреляционные

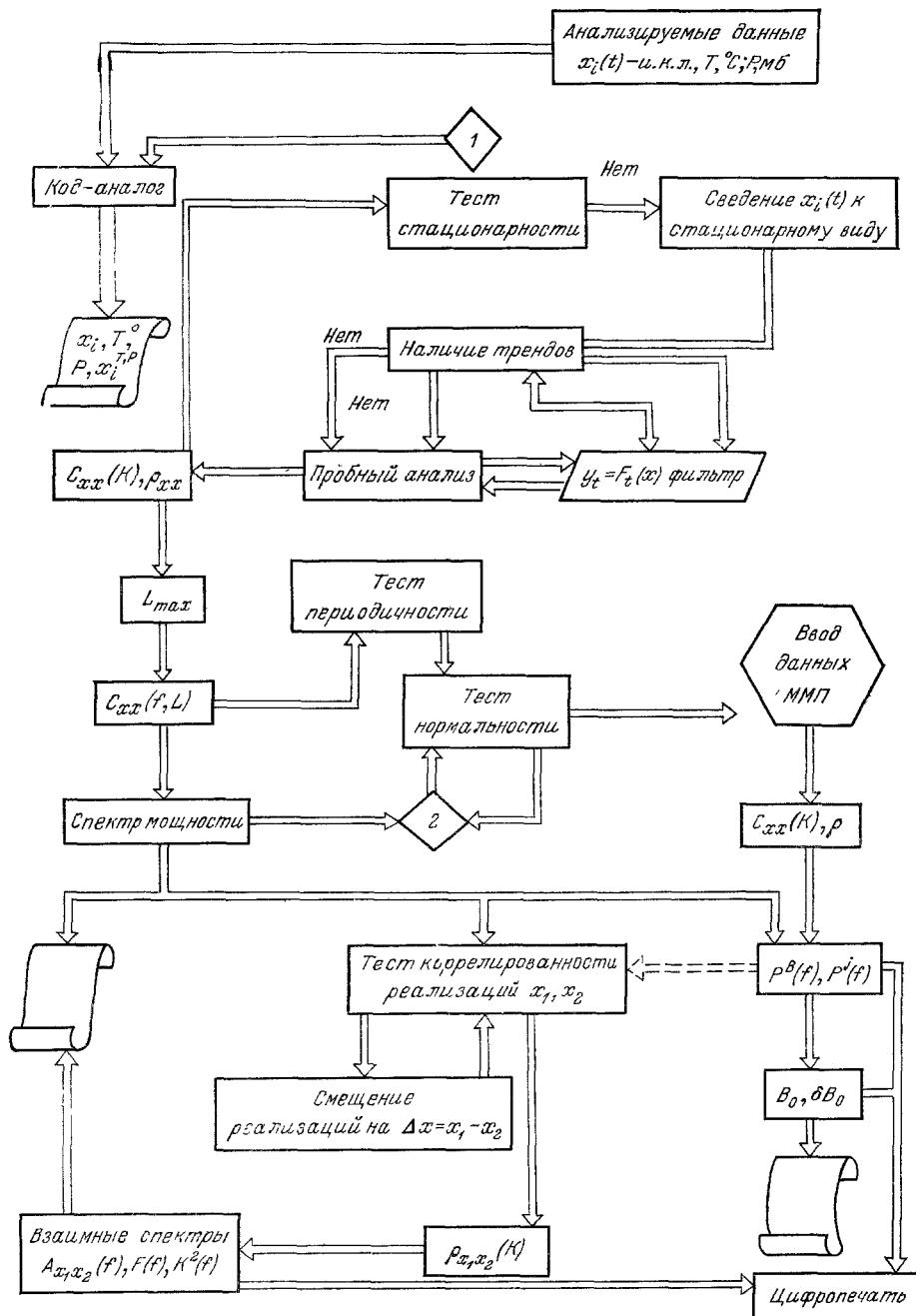


Рис. 1. Блок-схема программы анализа короткопериодических вариаций (флуктуаций) космических лучей, (анализируемые данные передаются в программу через 1)

методы и метод статистического периодограмм анализа показались недостаточно информативными из-за малости исследуемых массивов. Что же касается изучения флуктуаций по большим массивам, то это приводило к значитель-

му сглаживанию результатов, что особенно явно сказалось в ряде работ. Метод Фурье, при всей его полезности и допустимости для вычислений, позволяет рассчитывать амплитуды, периоды и фазы неслучайных функций времени, что действительно лишь в случае, когда эти амплитуды, фазы и периоды фиксированы. Как показано в работе <sup>44</sup>, преимущества спектрального анализа заключаются в надежном и однозначном контроле сравнения различных записей, так как сопоставляются функции одного и того же параметра — частоты, причем никаких серьезных ограничений на поведение случайного процесса практически не налагается и спектральный подход дает блестящую возможность оценить не только наличие выделенных периодов в данных регистрации, но и их достоверность, хотя необходимо помнить, что никакая математическая модель не в состоянии отразить всю сложность флуктуационных явлений в космических лучах <sup>45</sup>.

Вопросам теории стационарных и нестационарных случайных процессов посвящено значительное число работ. Поэтому нет необходимости вдаваться в детали различных подходов спектрального анализа: остановимся лишь на основных представлениях, на основных стадиях анализа, алгоритмах для оценивания спектров и некоторых особенностях их использования применительно к изучению флуктуационных явлений в космических лучах. Практическая методика оценивания спектров состоит из нескольких этапов <sup>46</sup>: предварительный анализ; вычисления выборочных корреляционных функций и спектральных оценок; интерпретация полученных результатов. (Необходимо отметить, что предлагаемая блок-схема вычислений не является неким эталоном для применения: в каждой конкретной задаче целесообразно использовать лишь те этапы анализа, информативность которых приводит к необходимым оценкам.)

На рис. 1 приведена структурная блок-схема анализа флуктуационных явлений в космических лучах, корреляционных связей между этими флуктуациями (по данным наблюдений различными приборами) на различных станциях и различных параметров межпланетной среды. Пояснения к блокам программы блок-схемы приведены в терминологии работы <sup>47</sup>.

а) Аналитические данные: массивы данных измерения интенсивности космических лучей нейтронными мониторами и телескопами на различных станциях (или одной станции)  $N_{ik}(t)$ ; результаты измерения давления  $P_{ik}(t)$  и температуры  $T_{ik}(t)$ , значения коэффициентов связи  $W_{ik}(R)$ , где  $i$  — номер прибора,  $k$  — номер станции

б) Введение поправок на метеоусловия: операции ввода поправок на давление и температуру, заключающиеся в стандартной процедуре <sup>1-3, 26</sup> ввода поправок на давление с барометрическим коэффициентом (блок I)

$$\beta_{\text{per}}(h_0) = \frac{\int_0^{\pi/2} N(h_0, \theta) \beta(h, \Delta\varepsilon, \theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} N(h_0, \theta) d\theta},$$

где  $\beta(h_0, \Delta\varepsilon, \theta)$  — барометрический коэффициент используемой компоненты для различных углов прихода частиц,  $N(h_0, \theta)$  — эффективная диаграмма направленности используемого прибора, и температуры

$$W_{t, \text{per}}(h_0, \Delta\varepsilon) = \frac{\int_0^{\pi/2} W_t(h_0, \Delta\varepsilon, \theta) N(h_0, \theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} N(h_0, \theta) d\theta}.$$

Значения плотностей температурных и барометрических коэффициентов для различных углов прихода частиц и уровней наблюдения приведены в работе <sup>33</sup>.

в) Вывод оптимального интервала анализа: задается введением диапазона исследуемых частот  $f_1 \leq f \leq f_2$ , где  $f_1 \geq 10^{-5}$  и  $f_2 \leq 10^{-2}$  Гц для флуктуаций космических лучей, обусловленных рассеянием на случайных неоднородностях межпланетного магнитного поля, и  $f_1 \geq 10^{-7}$  и  $f_2 \leq 10^{-5}$  Гц для флуктуаций, обусловленных секторной структурой межпланетного магнитного поля. Определяется интервал дискретизации данных:

- 1 мин для диапазона  $10^{-3} \leq f \leq 10^{-2}$  Гц,
- 5 мин для диапазона  $10^{-4} \leq f \leq 10^{-3}$  Гц,
- 1 час для диапазона  $10^{-5} \leq f \leq 10^{-4}$  Гц,
- 12 часов для диапазона  $10^{-6} \leq f \leq 10^{-5}$  Гц,
- 24 часа для диапазона  $10^{-7} \leq f \leq 10^{-6}$  Гц.

г) Тест стационарности: реализация разбивается на  $n$  равных интервалов, вычисляются средние значения данных, дисперсия для каждого интервала, эти последовательности проверяются на наличие в них трендов или других изменений во времени, которые не могут быть объяснены только выборочной изменчивостью оценок. Проверяется сходимость автокорреляционных функций исследуемых интервалов. Остановка программы, вывод промежуточной информации — графиков исходных массивов и автоковариационных функций.

д) Сведение процессов к стационарному виду (или квазистационарному): исключение трендов, фильтрация данных и т. д. (см. 44–46). Возвращение к блоку ТЕСТ СТАЦИОНАРНОСТИ, вторая остановка программы.

е) Пробный анализ: предварительное оценивание выборочных спектров мощности, решение вопроса о необходимости того или иного фильтра, решение вопроса об исследовании спектра во всем частотном диапазоне или его части. Третья остановка программы.

ж) Спектральный анализ: определение автоковариационных и автокорреляционных функций и выборочных спектров мощности, выбор необходимого значения точки отсечения (стягивание спектрального окна), вывод результатов по одномерным массивам. Четвертая остановка программы: АЦПУ, графопостроитель.

з) Тест периодичности: теоретически наличие квазипериодических составляющих в случайном процессе проявляется в виде  $\delta$ -функций в его спектральной плотности<sup>47</sup>. На практике оказывается, что спектральная плотность содержит острые пики, которые можно ошибочно приписать узкополосному случайному шуму, поэтому анализ периодичности осуществляется по данным вычислений автокорреляционных функций, выборочных спектров мощности, результатов пробного анализа и из физических соображений. Выводится информация о выделенных частотах и значениях амплитуды на этих частотах, продукт визуального контроля. Фактически тест периодичности — начальная фаза подготовки двумерного анализа.

и) Определение плотности распределения<sup>48</sup>): согласно<sup>47</sup> плотность распределения случайного квазистационарного процесса  $x_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N$ ) с нулевым средним отклонением  $\bar{x}$  можно оценить как

$$\hat{P}(x) = \frac{N_x}{NB},$$

где  $B$  — узкий интервал, симметричный относительно  $x$ ,  $N_x$  — число значений реализации, попадающих в интервал  $x \pm B$ . Значение  $\hat{P}(x)$  определяется путем разбиения всего массива анализируемых значений  $x_n$  на соот-

<sup>47</sup>) Приведенные тесты ж) и з), как и тест эквивалентности некоррелированных реализаций, пока в реальных программах обработки не применялись.

вествующее число равных по величине разрядов, табулирования величины  $x$  по разрядам и делением на ширину разряда  $B$  и объем выборки  $N$  таким образом, что в результате  $N$  значений последовательности  $\{x\}$  будет удовлетворять условию  $N = \sum_i N_i$ . Определение плотности распределения является

совершенно необязательной процедурой и используется как вспомогательный шаг для проверки получаемых распределений на нормальность.

к) Тест нормальности: проводится сопоставление полученной плотности распределения значений исследуемого процесса с теоретическим нормальным распределением. Одним из наиболее удобных критериев нормальности является критерий согласия  $\chi^2$ , где в качестве меры расхождения между теоретической и наблюдаемой плотностями используется распределение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i},$$

где  $k$  — число интервалов, в которые объединены данные,  $f_i$  — число наблюденных значений в  $i$ -м диапазоне<sup>47</sup>. Как и предыдущий, тест нормальности используется крайне редко, лишь при решении специальных задач.

л) Тест корреляционности реализаций: выясняется вопрос о существовании корреляции между массивами вводимых данных. Во многих случаях достаточно визуального оценивания основных физических свойств исходных процессов, в общем случае тест сводится к вычислениям взаимных корреляционных функций, коэффициента взаимной корреляции и функций когерентности. На этой стадии проводится оценка смещения между реализациями.

м) Тест эквивалентности некоррелированных реализаций: приводит к объединению результатов анализа отдельных реализаций, для которых установлена статистическая эквивалентность. Осуществляется путем расчета соответствующих средних взвешенных величин из оценок, полученных при анализе отдельных реализаций: если по отдельным реализациям получены оценки спектральной плотности  $G_1(f)$  и  $G_2(f)$  с соответствующими степенями свободы  $v_1$  и  $v_2$  (как правило, принималось  $v_1 = v_2$ ), то суммарная оценка спектральной плотности находилась в виде

$$G_p(f) = \frac{G_1(f)v_1 + G_2(f)v_2}{v_1 + v_2},$$

причем, число степеней свободы такой оценки  $v_p = v_1 + v_2$ <sup>56</sup>.

н) Определение взаимных корреляционных функций и взаимных спектров: проводится согласно алгоритмам<sup>46, 47</sup> и содержит сведения о зависимостях, которые могут наблюдаться между отдельными реализациями исследуемого процесса или различными процессами.

о) Определение функций когерентности: необходимо для оценивания коррелированности реализаций, точности оценок частотных характеристик и, наконец, непосредственного решения ряда прикладных для программы задач (смещение процессов друг относительно друга, определение статистической задержки между процессами и т. п.). Определение функций когерентности предшествует определению взаимных спектров мощности амплитудных и фазовых. Определение частотных характеристик проводится только в том случае, когда нет необходимости в выводе информации о всем спектре в целом, а необходимы лишь значения амплитуд и фаз на выделенных частотах, т. е. там, где функция когерентности макросимальна.

Предлагаемая блок-схема может рассматриваться как один из возможных путей получения информации о флуктуациях космических лучей, во-

многом набор блоков зависит от поставленной задачи, возможностей используемых ЭВМ и необходимой точности исследований. Приведенная структурная схема была реализована в виде трех программ; следует подчеркнуть, что каждый из блоков реализовывался в виде подпрограммы, так что все три программы во многом пересекались.

В заключение необходимо отметить, что приведенный выше обзор существующих методов анализа флюктуационных явлений в космических лучах (с рядом рекомендаций) отнюдь не претендует на полноту описания всех применяемых методов. Хорошие результаты получены Н. П. Чирковым и др. с помощью комплекса программ СВАН и В. И. Козловым с помощью метода цепных дробей. Тем не менее, описанные приемы позволяют проводить детальные исследования конкретных флюктуационных явлений на выделенных частотах (или в широком диапазоне частот) и оценивать их связь с различными процессами в межпланетном пространстве.

Для дальнейшего изучения процессов в межпланетном пространстве с помощью данных о космических лучах необходимо знание полной картины влияния этих процессов на возникновение и динамику формирования флюктуаций и проведение расчетов связи наблюденных флюктуаций с аналогичными флюктуациями межпланетного магнитного поля.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВТОРИЧНЫХ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Появление в последнее десятилетие значительного числа высокоточных приборов для изучения космических лучей позволило получить достоверные данные о флюктуациях галактических (а в периоды мощных протонных вспышек — и солнечных) космических лучей. Следует отметить, что регулярные, стандартные наблюдения на мировой сети станций проводились и проводятся в настоящее время, как правило, с часовой дискретностью, причем, для более надежного выявления изучаемых эффектов данные наблюдений приходится усреднять по нескольким станциям или приборам (поскольку точность каждого из используемых приборов недостаточна по сравнению с амплитудами эффектов). Использование приборов с точностью не хуже 0,2—0,3% в минуту позволяет проводить детальный анализ различных флюктуационных явлений в космических лучах по каждому из приборов в отдельности<sup>5,33</sup>.

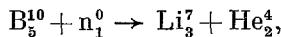
#### а) Космофизические приборы для регистрации космических лучей

Требования высокой статистической точности, стабильности и надежной работы всех узлов в установках и приборах для регистрации космического излучения в течение длительного времени накладывает определенный отпечаток на конструкции приборов. Создание высокоточных установок путем простого увеличения площадей регистрирующих приборов еще недостаточно — необходим разумный компромисс между числом детекторов, входящих в установку, и уверенностью, что количество отказов и имеющаяся нестабильность каждого из элементов прибора не сделают имеющуюся аппаратуру неуправляемой.

В настоящее время определяющую роль в исследовании природы вариаций космических лучей, в особенности короткопериодических (флюктуаций), играет комплексный метод регистрации космических лучей одновременно различными приборами во многих пунктах земного шара, на различных широтах и долготах, на различных высотах и под землей разного типа вариаций: вариаций глобальной и направленной интенсивности мезонной компоненты, вариаций интенсивности нейтронов на уровне моря, потока протонов, элек-

тронов и различных ядер первичного космического излучения в стратосфере и космическом пространстве и т. д.

Наиболее удачным из всех, применяемых пока космофизических приборов, является нейтронный супермонитор NM-64, используемый на всех станциях космических лучей на Земле. Нейтронный монитор состоит из трех шестисчетчиковых секций, каждая из которых имеет размеры порядка  $315 \times 220 \times 50$  см<sup>3</sup> и весит около 12 т; в области высоких широт скорость счета составляет около 240—250 тыс. импульсов за 1 час регистрации, в области низких — 200—220 тыс. В качестве детектора в нейтронном мониторе используются двухметровые пропорциональные счетчики диаметром 15 см, наполненные газом BF<sub>3</sub>, обогащенным изотопом B<sup>10</sup>. Счетчики окружены свинцом, используемым в качестве генератора нейтронов (эффективная площадь порядка 6,2 м<sup>2</sup>), и полистиленом, используемым в качестве замедлителя и рефлектора нейтронов. Регистрация нейтронов происходит в пропорциональном счетчике за счет реакции



основанной на том факте, что нейтроны легко захватываются ядрами атомов бора. В результате этой реакции освобождается энергия порядка 2,5 МэВ, причем на долю альфа-частицы приходится около 1,6 МэВ, а на долю ядра лития — 0,9 МэВ. Обе частицы разлетаются в противоположных направлениях, образуя 80 тысяч пар ионов. Появление в счетчике  $\alpha$ -частиц и большого количества ионов будет вызывать в нем разряд и относительно большой импульс на выходе системы, отмечая тем самым факт попадания нейтрона в счетчик. (Благодаря тому, что BF<sub>3</sub> принадлежит к гасящим газам, счетчик работает стабильно при коэффициенте усиления порядка нескольких тысяч.) Важной характеристикой нейтронного монитора является число нейтронов, генерируемых от протонов и  $\pi$ -мезонов различных энергий. (Необходимо отметить, что нейтроны космических лучей имеют вторичное происхождение, т. е. образуются в результате взаимодействия ядерноактивной компоненты космических лучей (первичных частиц, в основном протонов, а также различных вторичных частиц — мезонов, образовавшихся в атмосфере) с ядрами атомов воздуха. При этом, так как в образовании нейтронов участвуют в основном стабильные частицы, то интенсивность нейтронов будет определяться лишь массой вещества над установкой. Температура атмосферы практически на образование нейтронов не влияет, имеет место лишь легко учитываемый барометрический эффект. Исследования, выполненные различными авторами (см. обзор в <sup>1</sup>), показали, что доля нейтронов, образовавшихся в мониторе от нейтронов, родившихся в атмосфере, составляет величину порядка 80%, доля нейтронов, возникших в результате падения на монитор протонов всего 10—12%.

Регистрация космических лучей с помощью нейтронных мониторов не свободна от недостатков; нейтронный монитор — это прибор, «собирающий» космические лучи из всех направлений. Для целого ряда задач необходима направленная регистрация интенсивности космического излучения. Такие измерения могут быть выполнены только с помощью космофизических телескопов, сцинтиляционных или счетчиковых.

Космофизические телескопы, кроме того, позволяют не только изучать интенсивность космических лучей, приходящих из различных направлений, но и проводить такую регистрацию под землей, что особенно важно при регистрации космических лучей сверхвысоких энергий.

Телескопы, при всех различиях, имеют общие черты: набор групп детекторов, включенных на совпадения, что позволяет отбирать лишь такие события, когда частицы космических лучей проходят через все группы детекторов, включенных на совпадения, причем, для сепарации частиц по энергиям между различными детекторами устанавливаются свинцовые экраны различной толщины, поглощающие малоэнергичные частицы. На рис. 2 приве-

дена структурная схема сцинтилляционного телескопа ИЗМИРАН<sup>5,34</sup> (1—4, 7 — супертелескоп, 6 — нейтронный монитор, 5 — кондиционеры). Сцинтилляционный телескоп состоит из четырех идентичных приборов площадью 4 м<sup>2</sup> каждый, отбирающих частицы космических лучей с севера, юга, запада и востока и промежуточных азимутов под зенитными углами 27; 45 и 60°

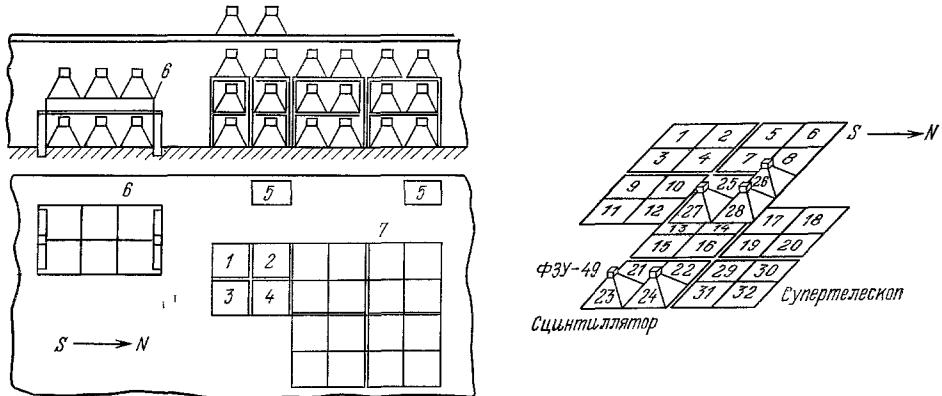


Рис. 2. Структурная схема сцинтилляционного телескопа ИЗМИРАН

и из вертикального направления прихода частиц. Детекторы сцинтилляционного телескопа представляют собой усеченную пирамиду, в нижнем основании которой находится пластический сцинтиллятор площадью 1 м<sup>2</sup>, в верхнем фотоэлектронный умножитель, регистрирующий фотоны, возникающие при прохождении космических лучей через вещество сцинтиллятора. Использование совокупности четырех приборов вместо сплошного «ковра» (рис. 3, а) позволяет использовать любой из этих приборов для каких угодно экспериментов без значительного ущерба непрерывной регистрации, производить замену и обслуживание любого из приборов, исключать информацию, возникшую за счет естественной радиоактивности, особенно при экспериментах под землей.

Применение сцинтилляционных детекторов в космофизике совершило фактическую революцию в этой области: кроме более детального изучения известных типов вариаций удалось вплотную приблизиться к изучению вариаций с короткими и очень короткими периодами. Возможность использования огромных площадей, высокая временная стабильность свойств сцинтилляторов, малое время высыечивания и другие характеристики делают сцинтилляторы исключительно перспективными при изучении флюктуаций космических лучей в наземных и подземных исследованиях. (На рис. 3 приведены сцинтилляционный телескоп и нейтронный монитор для регистрации космических лучей.)

#### б) Флюктуационные явления в космических лучах по данным измерений различными космофизическими приборами

Первые детальные наблюдения интенсивности космических лучей, выполненные М. Данжи и В. Сарабай<sup>52,53</sup> с помощью сцинтилляционной космофизической установки площадью 60 м<sup>2</sup> в Чакалтайя (Боливия), привели к обнаружению короткопериодических изменений интенсивности, носивших достаточно регулярный характер в течение длительного времени. Установка Данжи и Сарабай со средней скоростью счета порядка 10<sup>6</sup> импульсов в минуту состояла из трех идентичных приборов, установленных на высоте около 17 200 футов. Данные о космических лучах регистрировались каждые 12 с

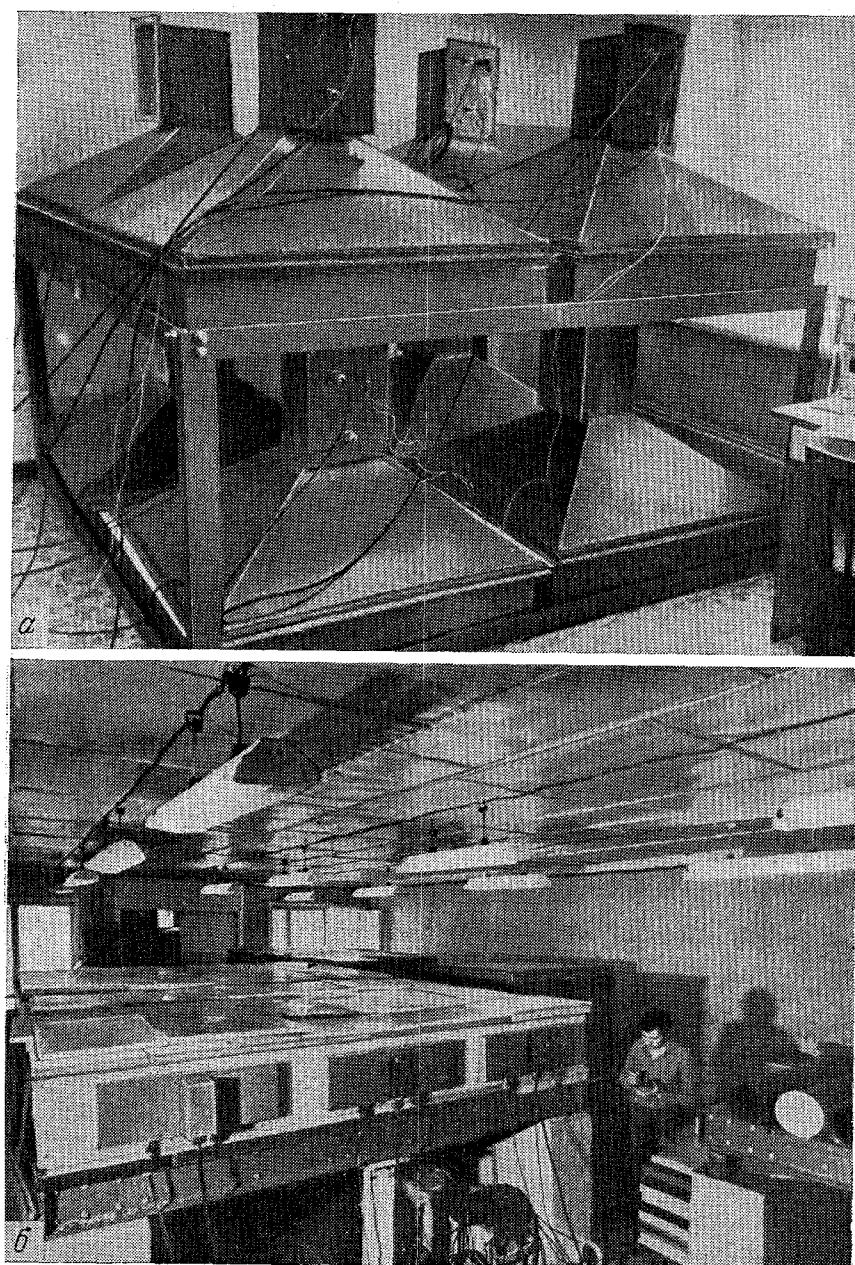


Рис. 3. Сцинтилляционный телескоп для подземной обсерватории Ала-Арча (Киргиз. ССР) (а), нейтронный супермонитор ИЗМИРАН (б)

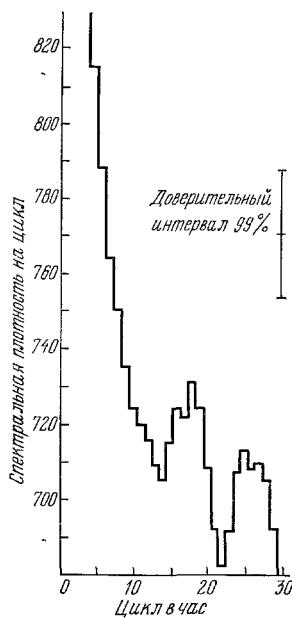
давление — ежеминутно. Для анализа спектра мощности флюктуаций использовались массивы данных по 180 значений в каждом при суммарном запаздывании порядка 30 и интервале дискретизации около 1 мин. Спектральные оценки, полученные из значительного наблюдательного материала (рис. 4), показывают постоянство пиков (в спектрах мощности флюктуаций) во всех исследуемых авторами трехчасовых интервалах. При совмещении спектральных оценок наблюдалось незначительное размазывание пиков в области спектральных частот от 1 до 6 циклов в час, что было в значительной степени связано с недостатками в обработке данных. Тем не менее в высокочастотной области наблюдались пики (15—16, 18 и 25 циклов в час), практически не подвергшиеся размазыванию.

Большая работа по изучению флюктуаций наклонной компоненты космических лучей за длительный период времени проводится с помощью нейтронных супермониторов мировой сети станций космических лучей. По данным часовых и пятиминутных значений интенсивности космических лучей в 1966—1969 гг. на станциях Алерт, Диц Ривер, Сульфур, Чакалтай и Калгари (интервал жесткостей геомагнитного образования 0,1—15 ГВ) выделены флюктуации космических лучей в широком диапазоне частот  $10^{-7}$ — $10^{-3}$  Гц<sup>54,55</sup>. Если исключить пики, связанные с вращением Земли и Солнца, то спектр флюктуаций космических лучей имеет явно выраженный степенной вид типа  $f^{-\gamma}$  (где  $1,65 \leq \gamma \leq 1,95$ ) и характеризуется наличием пиков на отдельных достаточно стационарных частотах.

Значительный вклад в исследование флюктуаций наклонной компоненты космических лучей внесли работы В. Козлова, Г. Крымского и Н. Чиркова<sup>56—63</sup>, основанные на результатах измерений космического излучения на Земле с помощью нейтронных супермониторов станций Тикси, Иркутск и

Рис. 4. Спектральные характеристики космических лучей по данным измерения на ст. Чакалтай<sup>52,53</sup>

Хабаровск за 1969—1983 гг. Для анализа использовались периоды наблюдений, характеризующиеся существенно различной обстановкой в межпланетном пространстве и магнитосфере Земли. Наряду с возмущенными периодами (15—21).5.1969 г., 20.7—2.8.1972 г., (18—24).1.1973 г., (12—18).4.1973 г. в качестве контрольных использовались периоды, когда геомагнитная и солнечная активности были низкими. Сопоставление полученных результатов для различных периодов показало, что во время мощных возмущений межпланетной среды и магнитосферы Земли в космических лучах появляются устойчивые флюктуации как в низкочастотном (с периодами  $\sim 7$  часов), так и в высокочастотном (с характерными периодами 15—20 и 40—50 минут) диапазонах. Появление и существование этих флюктуаций характерно только для возмущенных периодов. Спектры мощности, вычисленные по взаимной корреляционной функции данных наблюдений станций Тикси и Иркутск-Тикси и Алерт и ряда других станций, разнесенных по долготе, показывают, что, по крайней мере, 7-часовая вариация является общей для всех станций при наличии возмущений межпланетной среды и магнитного поля Земли. Результаты проведенных исследований трудно переоценить, поскольку в них проводится не только изучение практически неизвестного ранее явления, но и появляется надежда получить достаточно эффективный инструмент для прогнозирования различного рода процессов в межпланетном пространстве. В работах<sup>62,63</sup> исследуется связь изменения спектра мощности флюктуаций космических лучей, рассчитанного по данным наблюдений с помощью нейт-



ронных супермониторов, с прохождением мощных ударных волн. Увеличение амплитуды флюктуаций перед приходом ударного фронта в достаточно узком участке спектра (речь идет о флюктуациях с характерными периодами около 20 и 40 минут) и затем их значительное уменьшение после прохождения этого фронта указывает на динамику распространения ударных волн, причем, само это увеличение в определенном участке спектра «является как бы предвестником приближающейся ударной волны, а отсутствие их позволяет говорить об обнаружении «следа» за фронтом распространяющейся ударной волны»<sup>63</sup>. Детальное рассмотрение обнаруженного эффекта будет проведено ниже, а здесь лишь подчеркнем, что изучение флюктуаций космических лучей позволяет достаточно уверенно идентифицировать факт прохождения ударной волны даже при практическом отсутствии явных проявлений воздействия этой ударной волны на глобальную интенсивность космических лучей (т. е. при отсутствии форбуш-понижений). Так, возмущения межпланетной среды, наблюдавшиеся 22 сентября и 22 ноября 1978 г., лишь незначительно отразились на данных регистрации интенсивности космических лучей на высокопиротных станциях. Для периода сентября 1978 г. влияние межпланетных возмущений на наблюдаемую интенсивность космических лучей не проявилось вовсе, по крайней мере, визуально заметить ничего не удалось. Тем не менее, эффект появления флюктуаций с периодами порядка 20 и 40 минут в данных регистрации космических лучей проявился в полной мере<sup>41</sup>.

в) Флюктуации космических лучей  
во время форбуш-понижений  
интенсивности космического излучения  
на Земле и их корреляция с флюктуациями  
межпланетного магнитного поля

В результате исследования флюктуаций интенсивности нейтронной компоненты космических лучей по данным станций Тикси, Якутск и Хабаровск<sup>63</sup> в периоды с низкой геомагнитной активностью показано, что распределение мощности флюктуаций во всем исследуемом интервале (диапазоне) частот достаточно равномерное с амплитудами флюктуаций, не превышающими даже 95%-ный доверительный интервал. Таким образом<sup>63</sup>, флюктуации, находящиеся на уровне «шума», характерны для невозмущенных условий в солнечном ветре (рис. 5). До начала форбуш-понижений, вызванных квазистационарными структурами, хотя и наблюдается неравномерное распределение мощности флюктуаций, но на уровне общего «шума» (не более 95%). Непосредственно во время квазистационарных возмущений амплитуды флюктуаций хотя и превышают 95%-ный доверительный интервал, тем не менее распределены равномерно по всему частотному диапазону<sup>63</sup>. Напротив, во время эффектов Форбуша<sup>41,62,63</sup>, обусловленных нестационарными возмущениями, наблюдается «перекачка» мощности спектра в область высоких частот (флюктуации с периодами порядка нескольких десятков минут и меньше) до начала форбуш-понижения, и в область низких частот (флюктуации с периодами 40—50 минут и больше) во время форбуш-понижения и после него. В результате вычислений спектральных оценок по данным спин-

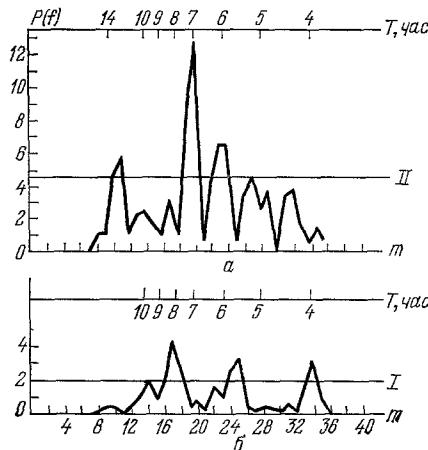


Рис. 5. Флюктуации космических лучей, характерные для возмущенных (a) и невозмущенных (b) событий в солнечном ветре<sup>60—62</sup>

тилляционного телескопа ИЗМИРАН <sup>33</sup> в 1977—1979 гг. показано, что независимо от наличия прямого, явного воздействия межпланетных возмущений нестационарного типа на космические лучи в данных наблюдения последних проявляются статистически значимые флуктуации (превышающие 95 %-ный доверительный интервал) с периодами 17—20 и 40—60 минут, если такое возмущение имело место в окрестностях Земли, причем величина чувствительности флуктуаций (иными словами расстояния от Земли до возмущения межпланетной среды) определяется лишь размерами неоднородностей в межпланетном магнитном поле, а, следовательно, энергией регистрируемых частиц <sup>42</sup>. Необходимо лишь отметить, что в частности, для сцинтилляционного телескопа ИЗМИРАН наиболее эффективно регистрируются флуктуации

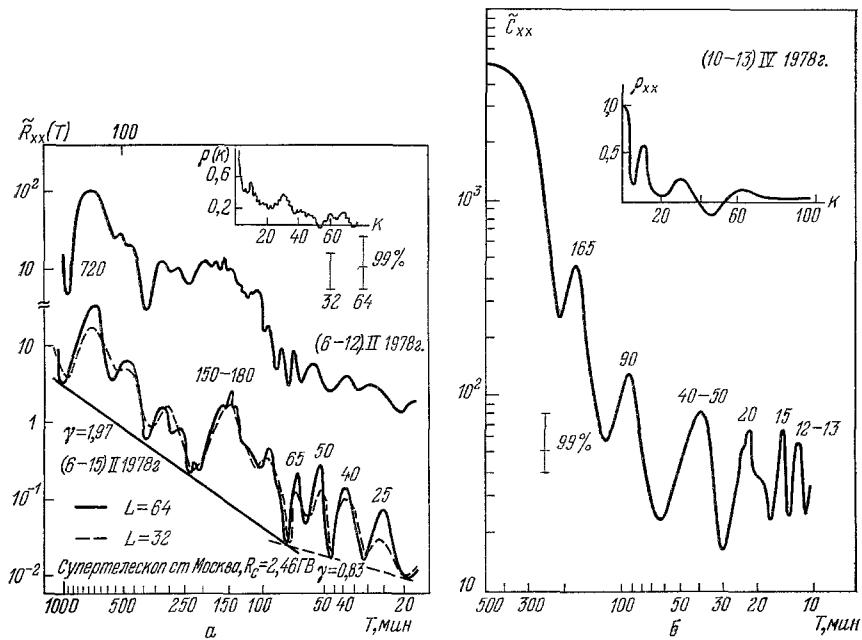


Рис. 6. Спектры мощности флуктуаций космических лучей для периодов 6—15 февраля (а) и 10—13 апреля (б) 1978 г. <sup>41</sup>

с периодами порядка от 20—40 до 165 минут (энергии 15—50 ГэВ), что соответствует максимуму коэффициентов связи используемого прибора <sup>5</sup>. По данным пятиминутных наблюдений общей ионизирующей компоненты интенсивности космических лучей в феврале 1978 г. были получены частотные спектры флуктуаций как для каждого суток исследуемого периода, так и для интервалов 7—12 и 7—15 февраля 1978 г. Степень достоверности полученных оценок контролировалась процедурой стягивания окна: спектры оказались устойчивыми при значениях запаздывания выборочной ковариационной функции, равных 32 для 7—12, 14 и 15 февраля и 64 — для 13 и 7—15 февраля. (Период 7—17 февраля был особенно интересен из всего месяца, поскольку на фоне сравнительно протяженного геомагнитно-спокойного периода с 1 по 12 февраля выделялось достаточно мощное возмущение в 21.45U Т 14 февраля. Расчеты спектров показали, что в течение всего периода до форбуш-понижения в спектрах отсутствовали выделенные частоты, в то время как в возмущенный период спектр мощности характеризуется наличием статистически значимых флуктуаций длительностью 12—14 и 17—20 минут (рис. 6, а), причем, дополнительный анализ (строились динамические спектры мощности за каждые сутки со сдвигом на каждые четыре часа) показал, что увеличение пиков, точнее их амплитуда, в высокочастотной части спектра до уровня, превышающего 99 %-ный доверительный интервал, произошло

между 1200 и 1600, т. е. практически за несколько часов до начала форбуш-понижения. Анализ флуктуаций космических лучей в апреле-мае 1978 г. по пятиминутным данным регистрации интенсивности космических лучей с помощью сцинтилляционных телескопов в ИЗМИРАН и Болонье показал довольно похожую картину: спектры мощности флуктуаций за 10—13 апреля и 29 апреля — 9 мая показали наличие флуктуаций, превышающих 95 %-ный доверительный интервал, с периодами порядка 17—20, 20—45, 95—115, 165 минут (рис. 6, б).

Спектральные оценки показали постоянство выделенных пики в во всех реализуемых индивидуальных выборках суточных интервалов. Совмещение всех вычисленных спектров для периода 28 апреля — 1 мая (использовались спектральные оценки для общей ионизирующей компоненты вертикального и наклонного телескопов ИЗМИРАН и Болонья и мюонной компоненты азимутального телескопа ИЗМИРАН) показывает совмещение, практически полное, всех оценок: полученный спектр практически не подвергается размыванию, выделяются устойчивые пики, соответствующие флуктуациям с периодами 12—13, 16, 20, 45 и 165 мин. Следует подчеркнуть, что ряд данных телескопа в Болонье, используемых для совместного анализа, принадлежал подземной установке: тем не менее результаты были достаточно близки к результатам наземных наблюдений. Вообще, изучение флуктуационных явлений в космических лучах по данным подземных телескопов<sup>64—68</sup> представляет значительный интерес: по данным регистрации жесткой компоненты космических лучей в Турине на глубине порядка 70 м в з. (средняя жесткость геомагнитного обрезания порядка 8 ГВ, средняя жесткость частиц около 250 ГВ) в течение шестимесячного периода (с сентября 1969 г. по март 1970 г.) и в течение семимесячного периода (с января по июль 1971 г.) было выполнено исследование спектра мощности флуктуаций космических лучей<sup>68</sup>. Экспериментально найденный спектр в интервале частот  $5 \cdot 10^{-7} \leq f \leq 2 \cdot 10^{-4}$  Гц сравнивался с ожидаемым в межпланетном пространстве спектром (согласно кинетической теории флуктуаций космических лучей с учетом данных о спектре мощности флуктуаций межпланетного магнитного поля, данных о форбуш-понижениях и данных о вариациях космических лучей, связанных с прохождением через центральный меридиан Солнца активных областей). Полученные результаты подтвердили выводы теории нелинейного взаимодействия космических лучей высоких энергий с возмущениями межпланетного магнитного поля, теорию диффузационного распространения космических лучей вплоть до жесткостей порядка 250 ГВ с учетом модуляции космических лучей активными процессами на Солнце. По данным пятиминутных наблюдений с помощью нейтронного супермонитора на высоте 3340 м над уровнем моря в районе Алма-Аты<sup>69б</sup> (жесткость геомагнитного обрезания порядка 6,7 ГВ) исследовались флуктуации космических лучей в интервале частот  $3 \cdot 10^{-5} \leq f \leq 2 \cdot 10^{-2}$  Гц. Частотные спектры мощности флуктуаций для спокойных периодов 6—14 июня 1975 г., 1—7 июля 1977 г. и 20—29 сентября 1978 г. показали, что в спектрах преобладает пик, соответствующий флуктуациям с периодом 3 часа 20 минут, резко подавляющий все остальные колебания. Что касается возмущенного периода 30 апреля — 7 мая 1978 г., то для него, как и в работах И. Либина<sup>41,42</sup>, наблюдаются колебания интенсивности космического излучения с периодами порядка 15 и 23 мии, а также 40, 90 и 160 мин (рис. 6). Исследования флуктуаций в интервале частот  $2 \cdot 10^{-7} \leq f \leq 10^{-4}$  Гц по данным наблюдений на станциях Вашингтон, Резольют, Киль, Дип-Ривер, Пик-де-Миди показали, что во время возмущений спектральный индекс флуктуаций меняется в пределах  $2,0 \leq f \leq 3,0$ , что соответствует увеличению числа неоднородностей масштаба  $10^{11}$  см и выше. Изучение флуктуаций ММП во время прохождения ударных волн в окрестностях Земли по данным о флуктуациях космических лучей, полностью подтвердило эффект увеличения мощности высокочастотной части спектра за сутки до начала возмущения с последующей «перекачкой» мощности

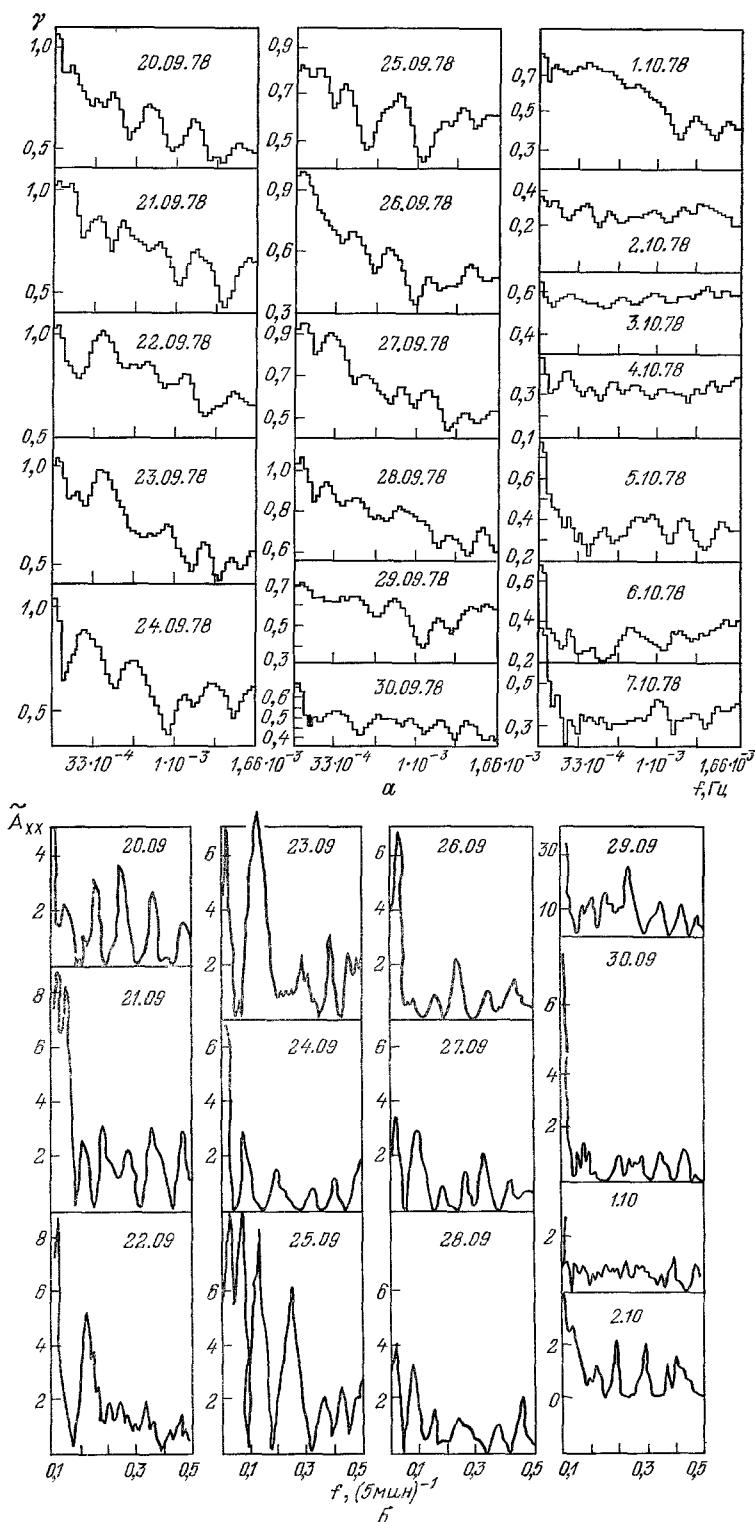


Рис. 7. Изменения значений показателя  $\gamma$  (а) и мощности спектральных оценок (б) для событий в сентябре—октябре 1978 г. <sup>41,42</sup>

в сторону низких частот. Восстановление спектра к виду, характерному для геомагнитноспокойных периодов, происходит примерно через сутки после начала возмущения. Совместный анализ флюктуаций в ММП и интенсивности космических лучей показывает одновременное существование колебаний с периодами 40—45 и 80—90 мин, что, возможно, указывает<sup>69—71</sup> на существование механизма турбулентной генерации (рис. 7,  $l = \gamma + 2$ ).

Методом спектрально-временного анализа исследовались динамика и частотные спектры флюктуаций ММП и космических лучей в периоды, предшествующие и последующие началу возмущений межпланетной среды в окрестностях Земли, для периодов 8—10 июня 1968 г. и 20—22 ноября 1977 г.<sup>69в</sup>. Полученные результаты продемонстрировали практически полное совпадение как наблюдаемых флюктуаций, так и одновременность изменений спектров космических лучей и ММП, причем одновременное наблюдаемое усиление спектров мощности началось за 12 часов до начала возмущения.

Аналогичная перестройка спектров наблюдается и для случаев, когда Земля пересекает границу секторной структуры ММП. Анализ данных измерений интенсивности космического излучения на станции Тикси и измерения модуля ММП на КА «Эксилорер-33» показали, что за несколько часов до прихода границы сектора флюктуации КЛ в высокочастотной части спектра усиливаются, а затем максимум спектра смещается в область низких частот. Полученный результат хорошо согласуется с моделью рассеяния заряженных частиц на случайных неоднородностях ММП, поскольку прохождение границы сектора в окрестностях Земли «воспринимается» космическими лучами, как неоднородности большого размера.

#### г) Наблюдения флюктуаций космических лучей во время солнечных вспышек

Самостоятельный интерес представляет анализ флюктуаций космических лучей во время вспышек. В работе<sup>70</sup> по данным наблюдений космических лучей с помощью нейтронных мониторов на станциях Нидерхост, Лондон, Линдау, Лидс, Киль и Клаймакс были обнаружены дополнительные пики (с относительной амплитудой порядка 15 %) во временном ходе интенсивности солнечных космических лучей от вспышки 12 ноября 1960 г., появляющиеся в течение нескольких часов после достижения максимума. Аналогичные результаты обнаружены и для вспышки 4 августа 1972 г. (с относительной амплитудой порядка 5 %). По данным наблюдений с помощью нейтронных мониторов на станциях Тикси и Дип-Ривер найдены частотные спектры флюктуаций с характерными устойчивыми пиками, соответствующими флюктуациям космических лучей с периодами от 30 до 150 минут, что при скорости солнечного ветра порядка  $5 \cdot 10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  соответствует размерам неоднородностей порядка  $10^{11}—10^{12} \text{ см}$ . Полученные оценки подтверждаются оценками работы<sup>71</sup>, где на основании наземных наблюдений интенсивности космических лучей с помощью сцинтилляционного телескопа ИЗМИРАН 7 мая 1978 г., получены оценки характерных размеров неоднородностей в межпланетном магнитном поле, составляющие величину порядка  $10^{11}—0,5 \cdot 10^{12} \text{ см}$ . Аналогичное явление обнаруживается и для вспышки 25 сентября 1978 г.<sup>72</sup>: детальный анализ флюктуационных явлений в космических лучах показывает, что хотя непосредственным «вдохновителем» флюктуаций космических лучей во время вспышек являются неоднородности случайного межпланетного магнитного поля (в частности ударные волны), тем не менее инициатором, по крайней мере части этих флюктуаций (часть флюктуаций просто не удалось идентифицировать при сопоставлении с различными гео- и гелиофизическими параметрами), являются мощные хромосферные вспышки балла 2 и выше, вызывающие межпланетные и магнитосферные возмущения<sup>73</sup>, причем, скорее даже не изолированные вспышки, а их серии<sup>74</sup>.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТАХ В АТМОСФЕРЕ,  
В ОКОЛОЗЕМНОМ МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В работе <sup>75</sup> (по данным наблюдений 23 мая 1975 г. на баллонах над Сан-рику (Япония) с помощью пластического сцинтиллятора с эффективной площадью 4 м<sup>2</sup>) определен спектр мощности флуктуаций космических лучей в диапазоне частот  $3 \cdot 10^{-4} \leq f \leq 10^{-2}$  Гц. Выявлен значительный пик на ча-

стоте  $3 \cdot 10^{-3}$  Гц, соответствующий наличию флуктуаций космических лучей с амплитудой порядка 0,16 % и периодом порядка 5,5 мин. (Вне указанного пика спектр имеет степенной вид типа  $f^{-\gamma}$ , где показатель спектра  $\gamma$  равен 1,7 для измерений в 1972 г. и 2,1 — в 1975.) Флуктуации с аналогичными периодами наблюдались в экспериментах по исследованию потоков электронов и гамма-квантов в верхних слоях атмосферы <sup>76</sup> на высотных аэростатах. Анализ временных вариаций проводился в диапазоне 4—60 мин. На рис. 8 приведены результаты усреднения пяти периодограмм, причем наиболее достоверно выделяется период около пяти минут с амплитудой, достигавшей на различных отрезках полетов величины до 20 %. (Авторами сделан вывод о генетической связи пятиминутных флуктуаций излучения с процессами, происходящими на Солнце.) Что касается флуктуаций с большими периодами, то во время поле-

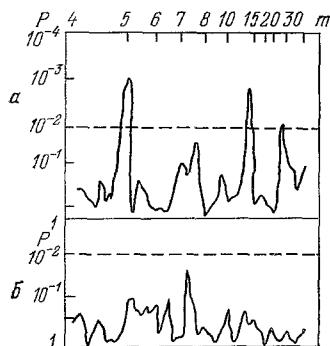


Рис. 8. Периодограммы флуктуаций интенсивности жесткого  $\gamma$ -излучения в верхних слоях атмосферы (a) и на уровне моря (б) <sup>76-78</sup>

тов наблюдались десяти-двадцати-, сорока-пятидесятиминутные флуктуации <sup>77-80</sup>, хотя характер этих колебаний потока излучения был значительно менее стабильным.

По данным измерений с помощью  $\gamma$ -телескопа «Наталия-1» на баллонах 20 августа 1979 г.  $\gamma$ -излучения с энергией больше 5 МэВ, электронов с энергией больше 20 МэВ и протонов с энергиями больше 100 и 500 МэВ были обнаружены квазипериодические пульсации <sup>79</sup> потоков регистрируемых частиц с периодами 1,1; 1,4; 10,4 и 33 мин. Аналогичные измерения, проведенные 23 августа в тех же условиях, также обнаружили аналогичные флуктуации с теми же периодами, причем амплитуда наблюдаемых флуктуаций для  $\gamma$ -излучения превышала амплитуду аналогичных флуктуаций заряженных частиц как минимум на порядок, что может быть объяснено, что флуктуации  $\gamma$ -излучения обусловлены волнами и нестабильностями в магнитосфере Земли. Анализ многочисленных измерений  $\gamma$ -излучения в 1972—1979 гг. доказал <sup>80</sup> наличие этих флуктуаций длительностью 1, 5, 12—15, 23—26 мин. с амплитудами порядка 5—20 %, причем наиболее эффективно модулируется поток  $\gamma$ -излучения с периодом порядка 5 мин. Необходимо лишь отметить, что аналогичные флуктуации наблюдались для тех же периодов и в данных радиоизлучения Солнца <sup>81,82</sup>. В работе <sup>82</sup> исследовалась связь флуктуаций наклона спектра и интенсивности сантиметрового радиоизлучения Солнца с солнечной активностью. Показано, что существует связь между устойчивыми 20- и 40-минутными флуктуациями в радиоизлучении Солнца с протонными вспышками <sup>84</sup>, причем амплитуда этих флуктуаций возрастает с повышением общей активности Солнца за несколько дней до возникновения вспышки и достаточно быстро уменьшается после нее. Действительно, за 20—24 часа до вспышки на Солнце <sup>85</sup> (все изучаемые события имели своей первопричиной вспышки или серии вспышек на Солнце балла 2—4) происходит мощная раскачка солнечной плазмы с периодом порядка 45 мин, вызывавшая увеличение амплитуды флуктуаций радиоизлучения в 10—30 раз к моменту вспышки. Расчеты

влияния пульсаций Солнца на возникновение флюктуаций космических лучей показывают, что наличие 20—50-минутных флюктуаций в солнечных космических лучах может быть интерпретировано только в рамках триггерного механизма солнечных вспышек, необходимо лишь хорошо себе представить, что в значительной степени наблюдения флюктуаций на поверхности Земли и в ее окрестностях связаны в значительной степени с галактическими, а не солнечными космическими лучами. Необходимо отметить, что все сопоставления спектров флюктуаций космических лучей и межпланетного поля носят, в основном, полукачественный характер: теория, объясняющая природу и механизм генерации наблюдаваемых флюктуаций космических лучей до конца не разработана; практически точно можно оценивать флюктуации межпланетного магнитного поля по соответствующим оценкам мощности флюктуаций космических лучей только для частиц, ларморовский радиус которых при движении в магнитном поле значительно больше (или меньше) основных размеров неоднородностей поля. Тем не менее даже качественное (или, скорее, полукачественное) сопоставление результатов исследования флюктуаций космических лучей с аналогичными флюктуациями межпланетного магнитного поля показывает<sup>27,68</sup> хорошее совпадение не только после усреднения этих результатов по значительному ансамблю найденных спектров, но и по конкретным спектрам, когда имелись одновременные измерения в космических лучах и межпланетном поле. К такому периоду относится сентябрь и ноябрь 1977 г., когда одновременно со систематическими наблюдениями различных компонент интенсивности космических лучей на поверхности Земли<sup>51,86</sup> проводились многочисленные измерения космического излучения и магнитных полей в межпланетном пространстве на ИСЗ «Метеор-2»<sup>87,88</sup>, SMS-2 и GOE-2<sup>89</sup>, КА «Прогноз»<sup>90</sup>.

Проведенные сопоставления хорошо согласуются с результатами расчетов спектров флюктуаций космических лучей (по данным различных станций) и спектрами межпланетного магнитного поля, полученными на ИСЗ IMP-3<sup>91</sup>. В диапазоне частот от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  Гц спектры могут быть представлены в виде  $f^{-\gamma}$ , где  $1,5 \leq \gamma \leq 2,0$ , причем при изменении вида спектра мощности флюктуаций межпланетного магнитного поля происходит практически аналогичное изменение в космических лучах<sup>43,91</sup>. Сопоставление характера изменений флюктуаций в широком диапазоне частот (периоды от 30 мин до 40 ч) по данным станций космических лучей Дип-Ривер, Туле, Мак-Мердо и Алерт с результатами измерений межпланетного магнитного поля на КА «Маринер-4» показывает не только совпадение формы спектра мощности флюктуаций, но и наличие выделенных частот в обоих измерениях<sup>92</sup>. Аналогичные результаты были получены при определении периодов колебаний интенсивности потоков протонов и электронов в радиационных поясах, полученные на ИСЗ «Космос-137»<sup>93</sup>. Дополнительным подтверждением взаимосвязи флюктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля явились измерения, выполненные на КА «Эксплорер-28, 33—35» и «Гелиос-1»<sup>94,95</sup>: исследования кратковременных изменений интенсивности потоков протонов (порядка 15 мин) непосредственно перед приходом межпланетной ударной волны, создающей в геомагнитном поле SC, показали значительный рост амплитуды флюктуаций за несколько часов до начала SC. Исследование спектра мощности колебаний магнитных неоднородностей межпланетного магнитного поля<sup>96</sup> в различные периоды возмущенности, связанные с солнечными вспышками, показало преобладание в спектре мощности межпланетного магнитного поля периодов порядка 20—40 минут, причем их интенсивность резко усиливается к моменту начала геомагнитной бури и мощность колебаний компонент поля значительно выше мощности колебаний модуля напряженности поля, хотя, в частности, периодов порядка 5 мин, наиболее часто встречающихся на Солнце, не наблюдалось<sup>96</sup>. Необходимо отметить, что в статистическом анализе<sup>96</sup> был применен метод Тьюки, при котором иногда происходит подавление имеющихся периодичностей<sup>33</sup>: анализ данных

измерений различных компонент напряженности межпланетного магнитного поля<sup>1</sup> по данным КА «Эксплорер-33», выполненный с помощью взаимного спектрального анализа (применились окна Тьюки — Парзена) показал<sup>97</sup> наличие не только значительного набора флюктуаций поля, но и достаточно хорошо идентифицируемые флюктуации (превышающие доверительный интервал 95%) с периодами в 50 и 160 мин, хорошо коррелирующие с аналогичными флюктуациями в космических лучах. Максимумы интенсивности космических лучей с точностью до нескольких минут совпадали с максимумами изменений межпланетного магнитного поля, и что самое существенное — максимальные значения амплитуд флюктуаций частиц наблюдались при пересечении КА тангенциальных разрывов<sup>94, 95</sup>, разделяющих волокна солнечного ветра. Причем, как спектры флюктуаций интенсивности космических лучей, так и спектры флюктуаций межпланетного магнитного поля, в эти моменты имели показатель  $\gamma$ , практически равный двум<sup>94–97</sup>. Спектры, вычисленные по наземным данным<sup>98</sup>, дают практически те же значения показателя  $1,92–2,90$  для периодов возмущений и  $1,1–1,5$  для спокойных в гео- и гелиофизическом отношении периодов, что также хорошо согласуется с прямыми измерениями межпланетного магнитного поля в космическом пространстве<sup>99, 100</sup> и результатами целого ряда теоретических исследований флюктуаций космических лучей<sup>101, 102</sup>. По данным наблюдений на поверхности Луны в течение 427 суток с помощью двух детекторов протонов<sup>103</sup>, доставленных «Аполлон-14», исследовался спектр мощности флюктуаций космических лучей в диапазоне частот от  $2,1 \cdot 10^{-7}$  до  $10^{-5}$  Гц. Обнаружено, что спектр имеет степенной вид с показателем степени порядка  $1,1 \pm 0,3$ , что хорошо согласуется с результатами других измерений, в частности наземных<sup>103</sup>, причем, так как измерения выполнены вне атмосферы и магнитосферы Земли, то это доказывает, что наблюдаемые флюктуации космических лучей обусловлены, как утверждают авторы, процессами рассеяния заряженных частиц космического излучения магнитными неоднородностями в межпланетном пространстве. Проведенное сравнение найденного верхнего предела для спектра мощности флюктуаций ММП<sup>27</sup> с найденным по данным наблюдений на поверхности Луны<sup>103</sup> с помощью детектора с нижним порогом регистрации протонов порядка 50 МэВ, показало, что наблюдавшийся на Луне спектр мощности флюктуаций космических лучей в интервале частот  $10^{-7}–10^{-5}$  Гц, оказался на два-четыре порядка выше теоретического верхнего предела. С другой стороны, в работе<sup>27</sup> не совсем точно учтено соотношение между  $P_B(f)$  и  $P_j(f)$ , что приводит к завышению теоретической оценки  $P_j(f)$ . Кроме того, сопоставление формы спектра, полученного по данным регистрации интенсивности космических лучей на поверхности Луны<sup>103</sup> с аналогичными спектрами, вычисленными по наземным данным для спокойных периодов, показывает, что с точностью до имеющихся погрешностей полученные результаты дают хорошее согласие при  $f \leq 10^{-5}$  Гц.

Таким образом, анализ проведенных в последние годы исследований приводит к выводу, что наиболее вероятным источником флюктуаций космических лучей как на поверхности Земли, так и в межпланетном пространстве являются флюктуации межпланетного магнитного поля, причем для частот, больших чем  $5 \cdot 10^{-5}$  Гц, основным, скорее всего, является вклад магнитозвуковых колебаний, генерируемых фронтами крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Амплитуды флюктуаций, связанных с расстоянием космических лучей на магнитных неоднородностях солнечного ветра, при генерации быстрых частиц на Солнце могут иметь величину не больше нескольких десятых процента.

То, что в ряде исследований не только не удалось проследить динамику формирования и развития флюктуационных явлений в космических лучах<sup>104</sup>, но даже выделить сами флюктуации, во многом связано как с неудачным расположением регистрирующей аппаратуры (в работах<sup>52, 53</sup> показано, что с увеличением жесткости геомагнитного обрезания амплитуды флюктуаций резко

падают вплоть до значений порядка 0,005 %), так и с несовершенством применяемой методики. Значительную помощь в решении вопроса о связи флюктуаций ММП и космических лучей дало исследование событий в космических лучах в конце 1977 г.<sup>86, 89, 105, 106</sup>.

Для выявления особенностей в спектрах мощности флюктуаций солнечных космических лучей перед вспышками предвспышечные периоды были

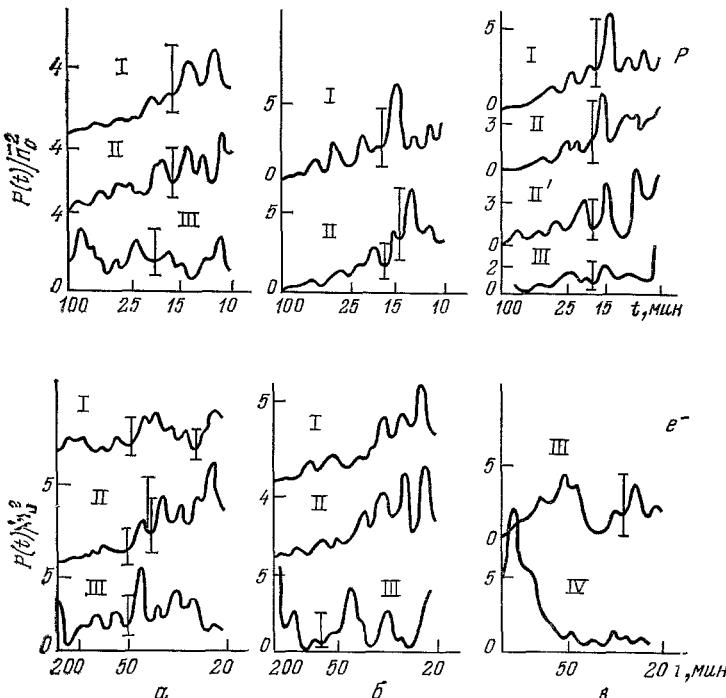


Рис. 9. Спектральные характеристики интенсивности потоков протонов и электронов на КА «Прогноз-6» для спокойных и возмущенных периодов в сентябре, ноябре и декабре 1977 г.<sup>107</sup>

разбиты на три интервала<sup>107</sup>, первый охватывал время до начала предвспышечного возрастания потоков солнечных малоэнергетических частиц (спокойный период), второй — период предвспышечного возрастания малоэнергетических частиц и третий — соответствовал вспышке энергичных частиц в начальной фазе спада.

Вычисленные выборочные нормированные спектры мощности флюктуаций потоков протонов и электронов для приведенных выше интервалов (римские цифры у кривых) в октябре (a), ноябре (b) и декабре (c) 1977 г. приведены на рис. 9 (вертикальные черточки — 95 %-ные доверительные интервалы, исходные массивы подвергнуты фильтрации с помощью фильтров Гаусса и первых разностей). Изучение приведенных спектров позволяет сделать ряд выводов:

— Во всех спектрах существуют пики, значительно отличающиеся от соседних, соответствующие флюктуациям с периодами 10–20 минут для фильтрованных рядов (см. рис. 9, a, б) и 20–25, 30–40, 50–60 и 90–100 мин для исходных массивов данных, причем наиболее отчетливо эти пики выделяются для протонов во время интервала III.

— Характерной особенностью всех спектров является наличие флюктуаций с периодами порядка 12–15 мин, амплитуды которых по мере приближения момента вспышки в значительной степени подавляются по сравнению с флюктуациями на остальных частотах, которые невелики в спокой-

ные периоды, возрастают перед вспышкой и значительно подавлены во время вспышки. Динамика поведения 15-минутных флюктуаций находится в некотором противоречии с флюктуациями на остальных частотах. Действительно, хотя для целого ряда периодов достоверность выделенных пиков не превышала 95%-ного доверительного интервала, тем не менее, расчеты спектров мощности для спокойных периодов показали уменьшение амплитуд всех флюктуаций (в области частот больше  $10^{-4}$  Гц) кроме 15-минутных. То, что динамика 15-минутных флюктуаций находится в противоречии с поведением остальных, свидетельствует, по-видимому, о различных механизмах, обеспечивших их возникновение. Если появление флюктуаций на остальных

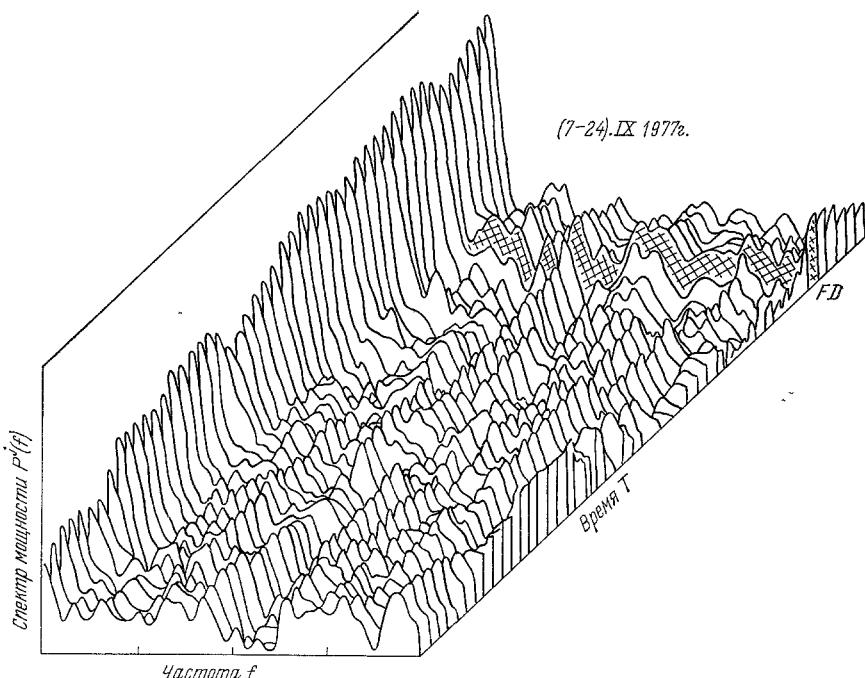


Рис. 10. Спектры мощности флюктуаций интенсивности нейтронной и общей компоненты космического излучения для периода 7—24 сентября 1979 г.<sup>109</sup>

частотах есть результат рассеяния заряженных частиц космических лучей на случайных неоднородностях межпланетного магнитного поля, то трудно себе представить появление в спокойные периоды неоднородностей только одного периода (характерного размера), в значительной степени превышающих число остальных, и, следовательно, с достаточно большой вероятностью можно утверждать связь между 15-минутными флюктуациями и солнечной активностью, тем более, что 15-минутные колебания были обнаружены на самом Солнце в активных областях КА ОГО-8. Однако это уже вопрос интерпретации, который будет рассматриваться позже.

Для ряда анализируемых событий, в особенности для электронов во время интервалов III, характерно появление флюктуаций с более длинными, чем у остальных флюктуаций периодами, причем для всех спектров характерно смещение максимумов в более низкочастотную часть спектра во время вспышек, что хорошо согласуется с наземными данными, точнее с результатами расчетов флюктуаций космических лучей по данным регистрации на Земле 12.11, 22.11, 27.12.1977 г. и 30.4—7.5.1978 г. На рис. 10 приведены спектры мощности флюктуаций нейтронной и общей компоненты для 7—24 сентября 1977 г. Такие флюктуации обладают целым рядом выделенных пиков: в осо-

бенности хорошо прослеживается динамика увеличения флюктуаций с периодами порядка 20 и 30—40 мин для событий 12 октября, 27 декабря 1977 г. и 30 апреля 1978 г.; для спектров, относящихся к 22 ноября и 7 мая пики в высокочастотной области большей  $5 \cdot 10^{-4}$  наблюдались не столь отчетливо.

Сопоставление полученных для солнечных космических лучей спектральных оценок с аналогичными оценками для галактических космических лучей в наземных наблюдениях, изучение динамики формирования и развития этих оценок показало хорошее согласие: как в наземных условиях, так и во время наблюдений на КА обнаружены выделенные пики, не превышающие, кроме 15-минутных, в спокойных условиях 90—95%-ных доверительных интервалов и соответствующие широкому набору флюктуаций. Наличие сложной, быстро меняющейся картины в спектрах мощности представляет известную трудность при обработке и анализе полученного материала, зачастую после целой серии расчетов спектров и выявления ряда, казалось бы, строгих закономерностей, появляется событие, результаты обсчета которого не вполне согласуются с имеющимися. Тем не менее статистически полученные в экспериментах на КА «Прогноз-6», «Метеор-2», «Аполлон-14» и ряде других аппаратов результаты указывают на флюктуации космических лучей, как на возможный показатель состояния межпланетной среды.

## 5. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ФЛЮКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Как было указано в начале работы, источники флюктуаций космических лучей, наблюдаемых на поверхности Земли, можно отнести к пяти классам: флюктуации, связанные с ускорительными процессами на Солнце и в межпланетном пространстве; флюктуации, имеющие своим источником колебательные процессы на Солнце (в солнечной короне, при выходе из солнечной квазиловушки); флюктуационные процессы при распространении заряженных частиц космического излучения в межпланетном пространстве (рассеяние заряженных частиц на случайных неоднородностях межпланетного магнитного поля, ударных волнах); и, наконец, флюктуации, связанные с короткопериодическими колебаниями различных параметров атмосферы и магнитосфера Земли.

Детальные экспериментальные исследования<sup>5, 22, 28–30, 41–43, 52–53, 60</sup> показывают, что короткопериодические колебания атмосферных параметров (давления, температуры, влажности) источниками наблюдаемых флюктуаций космических лучей быть не могут. Действительно, детальный анализ пятиминутных значений давления за февраль — сентябрь 1978 г., сентябрь — октябрь 1979 г., апрель — июнь 1980 и март — сентябрь 1982 г. показывает, что спектры мощности флюктуаций давления и приземной температуры в диапазоне частот  $10^{-4} \leq f \leq 1,7 \cdot 10^{-3}$  Гц отличаются практически полным отсутствием выделенных пиков<sup>22, 28</sup>. (Даже в те немногие моменты, когда пики наблюдаются, их амплитуды таковы, что они могут обеспечить флюктуации космических лучей с амплитудами не более чем 0,005—0,01%<sup>108, 109</sup>. Что касается вклада атмосферных вариаций в диапазоне частот  $f \leq 10^{-4}$  Гц, то поправки, вносимые в данные регистрации космических лучей, полностью исключают этот вклад<sup>108</sup>.)

Попытки объяснить наличие флюктуационных явлений в космических лучах с помощью флюктуаций температуры на различных высотах также мало обоснованы, поскольку из-за большой инерционности атмосферы практически не наблюдалось быстрых изменений температуры<sup>2, 39, 45</sup>; ряд приборов, по данным которых находились спектры мощности флюктуаций космических лучей (в частности, найтронные супермониторы), обладают не столь значительным температурным эффектом<sup>39</sup>.

Что же касается флюктуаций магнитного поля Земли и магнитосферы, как одного из источников наблюдаемых флюктуаций космических лучей, то хотя эти флюктуации и их амплитуды коррелируют с флюктуациями маг-

нитосферы и геомагнитного поля<sup>60</sup>, тем не менее, появление значимых флюктуаций и одновременный рост  $K_p$ -индекса связаны скорее с общим источником: возмущениями межпланетной среды в окрестностях Земли. Тем более, что при исследовании флюктуаций на станциях с различными жесткостями геомагнитного обрезания наблюдается рост амплитуды флюктуаций с уменьшением жесткости<sup>52, 53</sup>, что связано, во-первых, с увеличением доли относительно низкоэнергетических частиц, и, во-вторых, с незначительным вкладом короткопериодических изменений геомагнитных и магнитосферных параметров в наблюдаемые флюктуации космических лучей (по данным измерений жесткостная зависимость амплитуды флюктуаций космических лучей составляет величину порядка  $R^{-1}$ ). Проведенные расчеты показывают, что максимальные амплитуды флюктуаций космических лучей, которые могут быть обеспечены флюктуациями магнитосферных и геомагнитных параметров, как целый ряд флюктуаций, имеют амплитуды в несколько десятых %. Необходимо отметить, что все сказанное относится к частицам с энергиями до 1 ГэВ, что же касается флюктуаций высокоенергетических частиц космических лучей, регистрируемых нейтронными мониторами и телескопами, то эффекты воздействия на них вариаций геомагнитного поля и магнитосферы будут существенно ниже (меньше 0,01—0,03%).

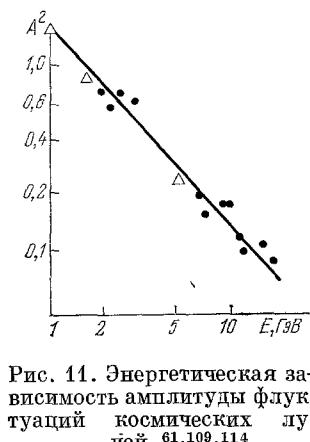


Рис. 11. Энергетическая зависимость амплитуды флюктуаций космических лучей<sup>61, 109, 114</sup>

ры и геомагнитного поля показывает, что решающую роль в возникновении и развитии флюктуационных явлений в космических лучах играют процессы, условно относящиеся к первым трем классам, т. е. по крайней мере основная часть флюктуаций космических лучей имеет внеземное происхождение и, следовательно, все теоретические расчеты оправданы.

В работах<sup>41, 42, 98, 110–112</sup> указывалось на изменение показателя спектра флюктуаций космических лучей между 1,1 и 3,4 в широком диапазоне частот с изменением характера анализируемых периодов (от спокойных до возмущенных). Общая мощность в спектральной полосе  $10^{-6}—10^{-4}$  изменяется на фактор, больший 3, за 3—4 месяца<sup>61, 112</sup>. Изучение изменчивости спектров мощности флюктуаций космических лучей в диапазоне частот  $10^{-5} \leq f \leq 10^{-2}$  Гц может дать ценную информацию о механизме модуляции<sup>27, 55, 113</sup>. В связи с этим чрезвычайно важно представляется изучение зависимости от энергии амплитуды флюктуаций космических лучей, которое проводилось по данным регистрации интенсивности космических лучей на станциях Тикси и Якутск<sup>61</sup>, а также Москва, Нальчик, Болонья<sup>114</sup>. На рис. 11 приведена зависимость квадрата амплитуды семичасовой вариации от энергии во время событий в августе 1972 г., апреле — мае 1978 г. и сентябре 1979 г. Видно, что амплитуды флюктуаций увеличиваются с уменьшением энергии, указывая на вненагнетитосферный характер наблюденных флюктуаций<sup>61</sup>. Динамика частотного спектра флюктуаций космических лучей, наблюдавшаяся во время форбуш-понижений<sup>56–58, 61, 110, 111</sup>, сопровождающихся магнитными бурями, указывает на внеземной источник — межпланетные ударные волны, как один из наиболее вероятных механизмов образования флюктуаций. Сопоставление спектров мощности флюктуаций космических лучей и данных измерений межпланетного магнитного поля показало хорошее соответствие периодов наблюдаемых флюктуаций. Это в свою очередь, как указывает В. И. Козлов<sup>61</sup>, объясняет причину появления флюктуаций в интенсивности космических лучей — квазипериодические колебания магнитного поля в ударных волнах: «появление флюктуаций интенсивности космических лучей преимущественно

в ударных волнах поршневого типа объясняется тем обстоятельством, что именно в поршневых ударных волнах происходит одновременное относительно большое сжатие среды и уменьшение коэффициента диффузии<sup>61</sup>. Оценки величины ожидаемых эффектов флюктуаций в космических лучах<sup>56-58</sup> хорошо согласуются с данными расчетов спектров интенсивности космических лучей в периоды прохождения вспышечных ударных волн, что позволяет сделать ряд выводов о роли колебательных структур магнитного поля ударных волн в образовании флюктуаций. Действительно, амплитуда колебаний поля в поршневых ударных волнах часто в десятки раз превышает

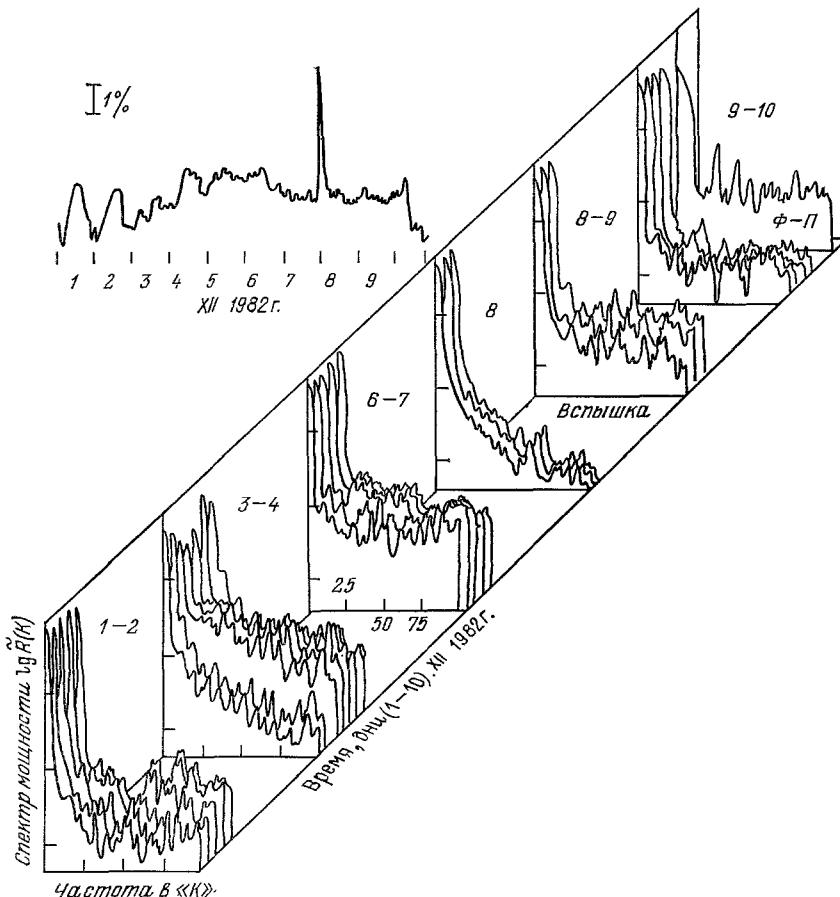


Рис. 12. Динамический спектр мощности флюктуаций интенсивности общей компоненты космических лучей в декабре 1982 г. для вспышки 8.XII 1982 г. и форбуш-понижения 12.XII 1982 г.

амплитуду  $B_0$  и заряженные частицы космического излучения, попадая в область действия магнитного возмущения поршневой ударной волны начинают отражаться, что приводит к появлению флюктуаций на тех же частотах<sup>115, 116</sup>. Кроме того, сильная регуляризация поля, наблюдаемая во время прохождения мощных ударных волн, проявляется в значительном смещении максимума спектра мощности флюктуаций в низкочастотную область, что означает фактически отсутствие мелкомасштабных неоднородностей в межпланетном магнитном поле (см. рис. 12, измерения за 8.12.1982 г.). Сопоставление результатов измерений спектров флюктуаций космических лучей и поля<sup>117</sup> во время августовских событий 1972 г., полностью подтвердило вывод об увеличении масштаба неоднородностей (турбулентности), сделанный при изучении динамических спектров флюктуаций космических лучей<sup>61</sup>. В свою

очередь регуляризация поля должна привести к ужесточению спектра космических лучей<sup>118–122</sup>. Что касается спокойных периодов (когда значительные возмущения межпланетной среды отсутствуют), то спектры флуктуаций космических лучей характеризуются широким набором пиков практически во всех частотных диапазонах, что связано с сильной турбулизацией межпланетного магнитного поля, т. е. с наличием неоднородностей практически любых масштабов<sup>123, 124</sup>. Большинство неоднородностей (с масштабами порядка  $10^{10}$ — $10^{12}$  см) является тангенциальными разрывами, разделяющими волокна солнечного ветра. Отдельные силовые трубы межпланетного магнитного поля перевиваются друг с другом, образуя сложную структуру, поле которой направлено перпендикулярно линии Земля — Солнце, причем спектр неоднородностей имеет степенной вид  $dh^2/dk \sim k^{-\gamma}$ , где  $h$  — случайное магнитное поле,  $k$  — волновой вектор,  $\gamma$  — показатель спектра, меняющийся в реальных условиях (в спокойной среде) от 1,1 до 2,0, из-за вариаций наклона и мощности спектра неоднородностей для различных условий в межпланетной среде<sup>61, 125</sup>. Рассеяние заряженных частиц одиночными неоднородностями<sup>123</sup> приводит к изменению движения частицы на малые углы. Используя зависимости транспортного пробега от жесткости и характера поля<sup>124</sup> и определив характерные размеры неоднородностей по данным о флуктуациях космических лучей, можно определить не только частотные спектры размеров неоднородностей межпланетного магнитного поля, но и спектры расстояний между ними.

Анализ спектров мощности космических лучей в спокойные периоды (по данным нейтронного супермонитора и спиритационного телескопа станции ИЗМИРАН за сентябрь 1978, апрель — май 1979 г., 3—5 декабря 1982 г.; см. рис. 12) показывает, что при средних значениях всех параметров величина  $B_0$  и спектр мощности ММП хорошо согласуется как с имеющимися данными по полу, так и с общими представлениями о виде спектра неоднородностей ММП в условиях его сильной турбулентности. Проведенные исследования подтверждают, что основным источником, ответственным за возникновение наблюдавшихся статистически значимых флуктуаций интенсивности космических лучей, является рассеяние заряженных частиц на случайных неоднородностях ММП, причем регуляризация поля (во время мощных солнечных вспышек, межпланетных ударных волн, и т. д.) приводит, во-первых, к появлению заметных пиков в спектрах, превышающих по меньшей мере 90-процентный доверительный интервал, и, во-вторых, к смещению этих пиков в низкочастотную область за счет передачи энергии от высокочастотных колебаний поля вниз по спектру. Причем, так как перестройка спектров начинается как минимум за несколько часов до начала возмущения межпланетной среды в окрестности Земли, то флуктуации космических лучей могут быть как бы «предвестниками» приближающейся к Земле ударной волны<sup>61</sup>.

Что касается второго источника флуктуаций космических лучей (колебательные и ускорительные процессы на Солнце), то данные о его существовании получены как на основе изучения флуктуаций электромагнитной компоненты солнечного излучения, так и на основе исследования флуктуаций солнечной активности и магнитных полей в атмосфере Солнца. В результате наблюдений временных изменений магнитных полей, пятен и интенсивности водородных флоккулов в Уссурийске<sup>126–128</sup> обнаружено наличие статистически значимых колебаний с периодом порядка 20—40 мин, аналогичных колебаниям, наблюдаемым по данным регистрации радиоизлучения  $\lambda = 3$  см<sup>82, 129</sup>. Чувствительность современных методов солнечных измерений доведена до такого уровня, что стали возможными измерения собственных колебаний Солнца. В работах А. Северного<sup>130</sup> и Х. Хилла<sup>131</sup> приводятся данные о двух типах колебаний с периодами порядка 40—50 и 160 минут, с которыми хорошо согласуются результаты спектрального анализа интенсивности солнечных космических лучей во время вспышек. Флуктуации с периодами порядка 160 мин присутствуют в спектрах мощности практически всегда, изменения касаются

лишь амплитуд этих флуктуаций, что косвенно подтверждает<sup>130</sup>. Исследование мощных хромосферных вспышек показало, что перед подавляющим большинством протонных вспышек происходит мощная раскачка радиофлуктуаций, начинаящаяся за сутки до вспышки и вызывающая рост амплитуды 20—60-минутных флуктуаций в 10—30 раз к моменту вспышки. Похожая картина наблюдается в солнечных и галактических космических лучах. По 5-минутным данным непрерывной регистрации космических лучей с помощью нейтронного супермонитора на станции б. Тикси были исследованы 132 флуктуации космических лучей в периоды 11 крупных событий с генерацией релятивистских протонов в солнечных вспышках: 28 января 1967 г., 25 февраля 1969 г., 24—25 января и 1—2 сентября 1971 г., 7 августа 1972 г., 29 апреля 1973 г., 30 апреля 1976 г., 22 ноября 1977 г., 7 мая и 23 сентября 1978 г., 12 октября 1981 г. Все данные наблюдений предварительно исправлялись на барометрический эффект. Для каждой вспышки был проведен анализ по четырем 8-часовым интервалам времени, которые выбирались следующим образом: 1) за сутки до вспышки, 2) за 12 часов до вспышки, 3) во время вспышки, 4) через сутки после вспышки. Для всех событий обнаружено, что за сутки до возрастаия потока солнечных КЛ от хромосферной вспышки наблюдаются пульсации КЛ с характерными периодами 30—40 и 60—90 мин, а для некоторых вспышек также с периодами 120—160 мин. Через сутки после вспышки флуктуации с выделенными периодами не обнаруживались. Причем, если во время форбуш-понижений (возмущений межпланетной среды в окрестностях Земли, начинающихся через значительное время после вспышки на Солнце), происходящая перестройка спектров объясняется достаточно просто<sup>109—111, 114</sup>, то в случае вспышечных событий такое опережение в космических лучах может быть объяснено при условии значительного увеличения транспортного пробега для рассеяния частиц в условиях сильно регуляризованного поля. Косвенные данные указывают на такое увеличение<sup>133</sup>. Необходимо отметить, что обнаруженные эффекты флуктуаций (опережение событий, перестройка спектра) сохраняют свои свойства даже тогда, когда в самих космических лучах вспышки (возрастания) и форбуш-понижения в явном виде не наблюдаются, что делает изучение флуктуаций замечательным диагностом межпланетной среды на расстояниях  $10^{11}$ — $10^{13}$  см от Земли и даже, как показывают последние исследования, еще дальше<sup>134—135</sup>.

## 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ И ИХ ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ С ПРОЦЕССАМИ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Многочисленные измерения межпланетной среды<sup>136</sup>, выполненные на космических аппаратах, показали, что межпланетное магнитное поле имеет в основном структуру, близкую к спиральной, на которую накладываются различного рода возмущения. Как указывается в работе<sup>136</sup>, « эти возмущения обусловлены разрывами и волнами в плазме солнечного ветра, анизотропией и пространственной неоднородностью скорости истечения солнечного ветра<sup>137</sup>, выносом поперечной компоненты корональных магнитных полей<sup>138</sup> и отражают динамические процессы на Солнце и в межпланетной среде». Флуктуации межпланетного магнитного поля с периодами от нескольких минут до нескольких часов производятся, в основном волнами и разрывами, в то время как более длительные изменения связаны со взаимодействиями потоков между собой и долгопериодными альфвеновскими волнами. Некоторые мелкомасштабные флуктуации могут возникать за счет взаимодействия фронтов или границ потоков, движущихся с различными скоростями, ряд<sup>139</sup> флуктуаций — за счет выноса из короны мелкомасштабных неоднородностей вместе с плазмой солнечного ветра. Поток неоднородностей от Солнца, вообще говоря, может быть представлен в виде трех частей: 1) перманентной, почти симметричной части, интенсивность которой может как-то зависеть

от уровня солнечной активности, но непосредственно не связана с активными образованиями; 2) рекуррентной, состоящей из долгоживущих корпускулярных потоков, связанных с солнечными пятнами и вызывающих в окрестностях Земли магнитные бури с постепенным началом; 3) неповторяющейся и состоящей из отдельных выбросов намагниченной плазмы от мощных хромосферных вспышек, вызывающих магнитные бури с внезапным началом и, как правило, приводящих к появлению статистически значимых флуктуаций межпланетного магнитного поля и космических лучей.

Изучение различных эффектов в самом солнечном ветре тесно связано с природой этих флуктуаций и их изменением с гелиоцентрическим расстоянием. Кроме того, флуктуации межпланетного магнитного поля, что хорошо видно из экспериментальных исследований, в значительной степени определяют условия распространения космических лучей и ответственны за различные эффекты в интенсивности космического излучения, наблюдаемые на Земле или в ее окрестностях. Это подтверждается изучением транспортного пробега для рассеяния космических лучей, определяемого интенсивностью рассеяния частиц космических лучей неоднородностями межпланетного поля: эксперименты показали, что транспортный пробег для рассеяния солнечных космических лучей не растет с удалением от Солнца<sup>139</sup> (как следовало бы ожидать, если все неоднородности рождаются вместе с солнечным ветром и затем радиально расходятся от Солнца), а наоборот, уменьшается. Следовательно, значительная часть неоднородностей появляется в процессе удаления солнечной плазмы от Солнца как результат постоянного развития различных видов плазменной неустойчивости и по характеру изменения спектра мощности флуктуаций интенсивности космических лучей можно судить о структуре межпланетного магнитного поля.

Изучение флуктуационных явлений в космических лучах фактически разделяется на целый ряд вполне самостоятельных задач, связанных с проблемой возникновения и развития этих флуктуаций в зависимости от различных процессов в межпланетном пространстве. Методам теоретического расчета таких флуктуаций в настоящее время посвящена обширная литература<sup>6–25</sup>. Впервые исследование флуктуаций функции распределения космических лучей было проведено В. Шишовым<sup>6</sup> в условиях, когда ларморовский радиус частицы в случайному поле много больше радиуса корреляции этого поля. При таком подходе удается пренебречь влиянием регулярного магнитного поля на движение заряженных частиц, а процесс рассеяния частиц на случайных неоднородностях магнитного поля определялся характеристиками корреляционного тензора, такими, как средний квадрат напряженности случайногополя  $H^2$  и его радиус корреляции  $L_c$ .

Дорман и Кац<sup>7–9</sup> рассмотрели задачу о флуктуациях функции распределения космических лучей для случая, когда на фоне случайных неоднородностей имеется сильное регулярное магнитное поле, так что ларморовский радиус частицы много меньше радиуса корреляции случайногополя. Необходимо отметить, что в работах<sup>7–9</sup> рассмотрение ведется для частиц с энергиями порядка (1–100 МэВ), что не позволяет применять теоретические построения авторов к флуктуациям космических лучей, наблюдаемым на Земле по даннымнейтронных мониторов и сцинтилляционных телескопов, поскольку эффективные энергии частиц, регистрируемых этими приборами, составляют 3–50 ГэВ.

Впервые теория, описывающая флуктуации космических лучей с энергиями, близкими к наблюдаемым в реальных экспериментах ( $\geq 1$  ГэВ), приведена в работах А. Оуэнса и Дж. Джокипи.

На основе кинетического уравнения рассматривалось движение заряженных частиц в стохастическом магнитном поле с отличным от нуля средним значением<sup>10–12</sup>. Детально анализировалось резонансное взаимодействие частиц и поля, а также эффекты, связанные с нелинейными членами кинетического уравнения. На основе полученных решений был найден спектр

межпланетных флюктуаций космических лучей с учетом анизотропии потока<sup>27</sup> и показано, что флюктуации космических лучей  $P^j(f, \mu, W)/J_0^2$  с энергиями порядка 1 ГэВ вызваны флюктуациями межпланетного магнитного поля  $P_{\perp}^B(f)/B_0^2$  со средней напряженностью поля  $B_0$ :

$$\frac{P^j(f, \mu, W)}{J_0^2} = C(f, \mu) \frac{P_{\perp}^B(f)}{B_0^2} (\delta_{||})^2,$$

где  $\delta_{||}$  — анизотропия потока космических лучей,  $C(f, \mu)$  — параметр, учитывающий нелинейное воздействие вблизи резонансных частот и зависящий от скорости солнечного ветра  $V$ , пинч-углового распределения частиц  $\mu$ , резонансной циклотронной частоты  $\omega_0$ , угла  $\varphi$  между направлением скорости солнечного ветра  $V$  и силовыми линиями магнитного поля  $B$ :

$$C(f, \mu) = \frac{(1 - \mu^2) \omega_0^2}{[(2\pi f \omega/V \cos \varphi) - \omega_0]^2 + \omega_0^2 \varepsilon^2}.$$

Проведенные по данным станции Алерт расчеты показывают, что наилучшее согласие между флюктуациями космического излучения и поля наблюдается для  $B_{\theta}$ -компоненты поля (коэффициент корреляции составляет величину порядка  $0,45 \pm 0,08$  по сравнению с  $0,17$  для  $B_{\varphi}$ -компоненты). Последнее связано с тем, что при наземных наблюдениях рассеяние заряженных частиц космических лучей на случайных неоднородностях межпланетного магнитного поля эффективно для частот  $f > 5 \cdot 10^{-6}$  Гц, на частотах  $f < 5 \cdot 10^{-6}$  Гц решающую роль начинает играть секторная структура межпланетного магнитного поля и долгопериодные вариации самих космических лучей. Сопоставление получаемых результатов с результатами исследований межпланетного магнитного поля<sup>16-21</sup> показывает, что такое разделение спектра в значительной степени определяется видом спектра магнитных неоднородностей в межпланетном пространстве в окрестностях Земли. Расчеты флюктуаций космических лучей<sup>22-23</sup> в области частот  $f < 10^{-5}$  Гц полностью подтвердили сделанные в работе<sup>27</sup> выводы о двойственной природе флюктуаций космических лучей в различных частотных диапазонах. Теоретические предпосылки к такому разделению имеются, если плотность потока космических лучей представить в виде нескольких компонент (в частности, конвективной и дифузационной составляющих):

$$n(t) = n_0 + \delta n_{\text{конвек}} + \delta n_{\text{диф}},$$

то мощность флюктуаций космических лучей в рамках такой модели

$$\frac{P_{xx}^j(f)}{J_0^2} = \frac{P_{yy}^B}{B_0^2} \frac{WV\omega \sin \varphi / 6\pi k_{||} \cos^2 \varphi}{f_0^2 + f_1^2},$$

откуда следует, что для частот  $f \sim 10^{-7}$  Гц

$$P(f) = 1,55 \cdot 10^4 \text{ Гц}^{-1} [1 + (f \cdot 10^5 \text{ Гц}^{-1})^{1,5}]^{-1}.$$

Сопоставление полученного результата с расчетами спектров мощности флюктуаций космических лучей в низкочастотном диапазоне обнаруживает вполне приемлемое согласие. Причем разделение плотности потока космических лучей на среднюю и флюктуирующую части не является произвольным<sup>31</sup>, а позволяет получить достаточно хорошее приближение спектра мощности флюктуаций космических лучей во всем частотном диапазоне и проследить его связи с аналогичными спектральными характеристиками для межпланетного поля. Исследуя разность интенсивностей космических лучей на Земле, приходящих из северного (N) и южного (S) направлений (северо-южную асимметрию N — S), А. Оуэнс показал, что спектр мощности флюктуаций космических

лучей<sup>31</sup>

$$\frac{P_N(k)}{n_0^2} = \frac{P_S(k)}{n_0^2} = P_{\perp}^B(k) B_0^{-2} \left[ \delta_z^2 + \left( \frac{\omega_0}{kW} \right)^2 \delta_x^2 \right]^{-1},$$

$$\frac{P_{N-S}(k)}{n_0^2} = \frac{4\delta_z^2 P_{\perp}^B(k)}{B_0^2}$$

и определяется не только спектром ММП  $P^B(f)/B_0^2$ , но и компонентами анизотропии  $\delta_x$  и  $\delta_z$  потока частиц.

На рис. 13 приведена суммарная мощность спектра флюктуаций  $P(f) = P_{\text{фл}}(f) + P_{\text{спект}}(f)$  в широком диапазоне частот, хорошо иллюстрирующая двойственный характер наблюдаемого спектра. Наличие такой двойственности при расчетах спектров по наземным данным сугубо достаточно широкие возможности: изучение высокочастотной части спектра флюктуаций космических лучей позволяет исследовать спектр неоднородностей ММП, по данным о спектрах в низкочастотной области можно судить о секторной структуре поля.

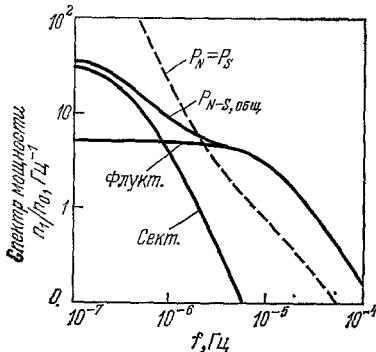


Рис. 13. Теоретически рассчитанный спектр мощности флюктуаций космических лучей (с учетом секторной структуры межпланетного магнитного поля)<sup>31</sup>

ется исследование флюктуаций в области высоких энергий частиц (больших нескольких ГэВ), распространение которых удовлетворительно описывается уравнениями диффузационной теории. Физически это связано с тем обстоятельством, что частица с большим ларморовским радиусом ( $R = cp/ZeH \gg R_c$ , где  $R_c$  — радиус корреляции случайного магнитного поля «видит» широкий спектр неоднородностей межпланетного магнитного поля, в то время как малоэнергичные частицы, взаимодействуя с высокочастотной частью спектра магнитных неоднородностей, приносят информацию о сравнительно узком участке спектра турбулентности магнитного поля. Малость амплитуды флюктуаций в области высоких энергий компенсируется тем обстоятельством, что измерения в этой области энергий проводятся наземными приборами со значительной статистикой и высокой точностью.

Если учесть, что диффузия является изотропной и случайное магнитное поле статистически изотропно, то можно получить сравнительно простое соотношение<sup>28</sup>, связывающее спектры мощности флюктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля:

$$P(f) = \left( \frac{\Lambda \nabla n}{R_c B_0} \right)^2 \left[ C_x B_0^2(f) + C_y \frac{\cos^2 \lambda}{4} B(f - f_0) \right],$$

где  $\Lambda$  — транспортный пробег частицы,  $R_c$  — ларморовский радиус частицы в регулярном магнитном поле  $H_0$ ,  $\nabla n$  — градиент концентрации космических лучей,  $C_x$ ,  $C_y$  — константы (порядка единицы),  $\lambda$  — асимптотическая широта станции наблюдения,  $f_0$  — частота вращения Земли,  $B(f)$  — спектр мощности ММП, которое предполагается однородным и изотропным в простран-

стве. На рис. 14 приведены спектры мощности флуктуаций космических лучей, вычисленные по данным ст. Ломницкий Штит и Восток за 15.05—20.12. 1979 г. (сплошные кривые) (а), и спектры, вычисленные из соотношения (9) для значений  $f_0 = 5 \cdot 10^{-7}$  Гц,  $B(f) = 16\gamma^2$ ,  $B_0 = 5\gamma$ ,  $\Lambda \nabla n / R_e B_0 \sim 1\%$  (б) для значений  $f_0 = 5 \cdot 10^{-7}$  см·с<sup>-1</sup>,  $B(f) = 75^\circ$  (штриховые кривые). Сравнение наблюдаемых спектров интенсивности космических лучей с рассчитанными на основе соотношения <sup>28</sup> показывает, что учет смещения частоты, связанный с вращением Земли (второе слагаемое в формуле) приводит к хорошему согласию

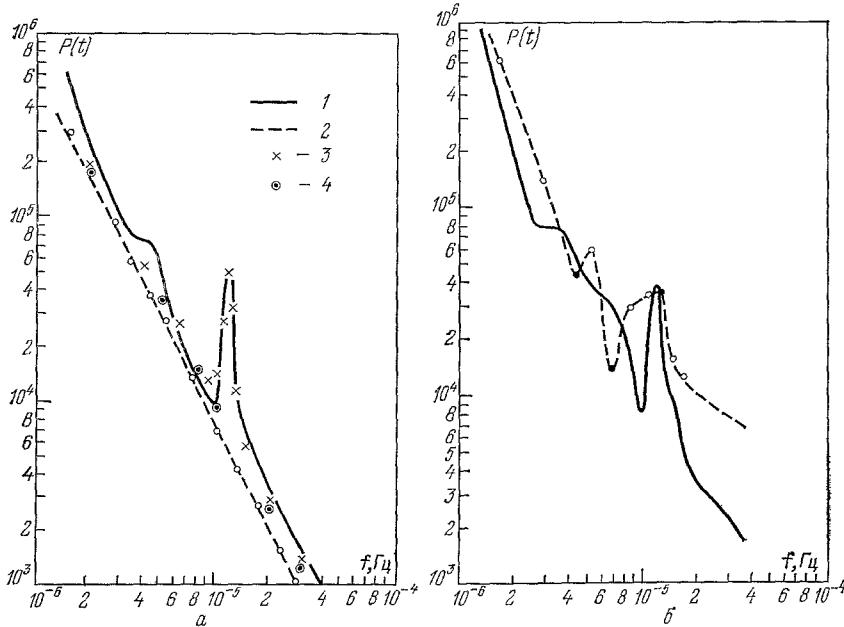


Рис. 14. Спектры мощности флуктуаций космических лучей <sup>133</sup>.  
1 — по данным<sup>2</sup> ст. Ломницки Штит, 2 — аппроксимация  $R(f) \sim f^{-1}$ ,<sup>28</sup> 3 — по формуле из <sup>133</sup>, 4 — без учета суточной вариации

экспериментальной и расчетной кривых. Решение обратной задачи приводит к значению показателя спектра мощности флуктуаций ММП порядка 1,85, что хорошо согласуется с прямыми измерениями ММП для того же периода.

Наиболее удобное для реальных расчетов спектра флуктуаций ММП по наблюдаемым флуктуациям космических лучей может быть получено при решении кинетического уравнения <sup>13-15, 24, 25, 29, 30</sup> в виде:

$$\frac{P_j(f)}{j_0^2} = \delta_{jj}^2 \langle\langle C_h(f) \rangle\rangle \frac{1}{2} \left( \frac{P_{xx}^B(f)}{B_0^2} + \frac{P_{yy}^B(f)}{B_0^2} \right),$$

где  $\langle\langle C_h(f) \rangle\rangle$  — член, учитывающий нелинейное воздействие вблизи резонансных частот

$$\langle\langle C_h(f) \rangle\rangle = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty C(R, \mu, f) W(R) dR F(\mu) d\mu}{\int_0^\infty W(R) dR \int_0^\infty F(\mu) d\mu},$$

$W(R) dR$  — коэффициенты связи между регистрируемой на поверхности Земли интенсивностью космических лучей и интенсивностью космических лучей, падающих на земную атмосферу,  $F(\mu) d\mu = \mu^n d\mu$  — питч-угловое

распределение,  $\varepsilon$  — безразмерный параметр и

$$C(R, \mu, f) = \frac{(1-\mu^2)\omega_0^2}{[(2\pi\mu f\omega/V_W \cos \varphi) - \omega_0^2] + \omega_0^2 \varepsilon^2}.$$

Учет всех параметров приводит выражение для спектра мощности флуктуаций космических лучей к громоздкому, но достаточно удобному для вычислений виду:

$$\frac{P_{\Phi_{\perp}}(f)}{j_0^2} = \frac{1}{2} \delta_{||} \left( \frac{P_{xx}^B(f)}{B_0^2} + \frac{P_{yy}^B(f)}{B_0^2} \right) \times \\ \times \frac{\int_0^\infty \int_{R_c}^\infty \frac{(1-\mu^2)(300B_0v/R)^2 W(R) dR \mu^n d\mu}{2\pi v f \mu - \left(\frac{300B_0v}{R}\right)^2 + \left(\frac{300B_0v}{R}\right)^2 \left(\frac{P_{\perp}^B(f)}{B_0^2}\right)^{2/k} \left(\frac{V \cos \varphi}{2\pi\mu}\right)^{2/k} \left(\frac{300B_0v}{R}\right)^{2/k}}}{\int_0^1 \mu^n d\mu \int_{R_c}^\infty W(R) dR},$$

где  $v$  — скорость частиц космического излучения,  $V$  — скорость солнечного ветра,  $B_0$  — напряженность межпланетного магнитного поля. Необходимо отметить, что приведенное выше выражение позволяет решать только прямую задачу: определение спектра мощности флуктуаций космических лучей по данным о флюктуациях межпланетного магнитного поля. Для решения обратной задачи приходится делать слишком много предположений, тем не менее, при  $\langle B \rangle \sim 5\gamma$ ,  $\langle v \rangle \sim 2,8 \times 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\langle \varphi \rangle \sim 45^\circ$ ,  $\langle V \rangle \sim 5 \cdot 10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\langle \delta_{||} \rangle \sim 0,1 - 0,2\%$  для значений  $n = 0, 1, 2$  расчеты были выполнены<sup>30</sup> (рис. 15). Наилучшее согласие между теоретическими (сплошные кривые) и экспериментальными (точки) спектрами флюктуаций космических лучей наблюдаются при  $n = 1$  или  $2$  для спокойных периодов в межпланетной среде. Проведение аналогичных расчетов без учета нелинейных эффектов дает спектр, существенно отличающийся (пунктирная кривая) от экспериментальных результатов.

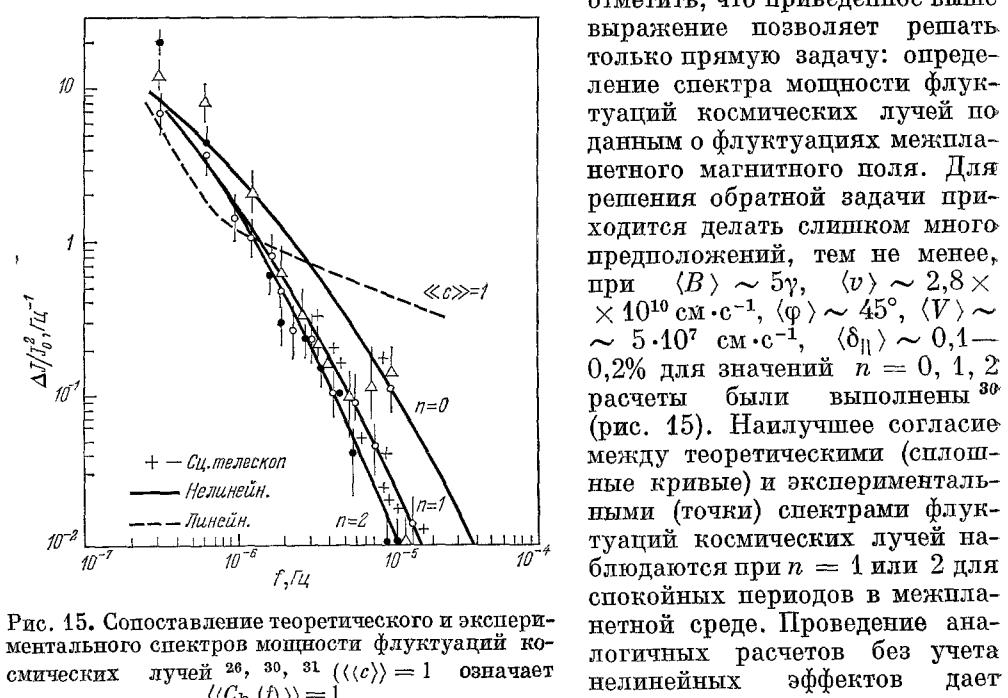


Рис. 15. Сопоставление теоретического и экспериментального спектров мощности флюктуаций космических лучей<sup>26, 30, 31</sup> ( $\langle\langle c \rangle\rangle = 1$  означает  $\langle C_h(f) \rangle = 1$ )

Оптимальным решением поставленной задачи явилось бы определение основных параметров межпланетной среды (напряженности межпланетного магнитного поля  $B_0$ , спектра мощности флюктуаций поля, скорости солнечного ветра  $V$ ) по данным о флюктуациях космических лучей. Такая возможность может быть достигнута либо при использовании спектрографа космических лучей<sup>32, 33</sup>, либо при одновременном использовании различных космофизических приборов (нейтронных супермониторов, мюонных и сцинтиляционных телескопов<sup>33-36</sup>). Хотя при использовании комплекса приборов на одной станции значения параметров межпланетной среды будут определены недостаточно точно (из-за различной энергетической чувствительности

приборов), тем не менее для оценочных результатов такой методикой можно пользоваться. Необходимо отметить, что описываемая методика не позволяет разделять значения  $B_0V$ : при проведении расчетов удается по данным о флюктуациях космических лучей получать информацию о спектре мощности флюктуаций ММП и произведении  $B_0V$ . При этом спектр флюктуаций ММП задается в степенном виде  $Af^{-\gamma}$ , что хорошо согласуется с наблюдаемыми результатами, хотя позволяет получать оценки только в широких диапазонах частот. Что касается исследования значений спектров мощности ММП в узких частотных диапазонах, то применяемый алгоритм расчета не описывает наличие выделенных пиков в спектрах мощности космических лучей и, таким образом, дает лишь усредненные характеристики поля. Для получения более точных характеристик необходимо ввести в выражение для связи между флюктуациями член, описывающий тонкую структуру спектров флюктуаций космических лучей, а, следовательно, и поля, поскольку выделенные частоты существуют и в спектрах флюктуаций поля<sup>39, 40</sup>

$$\frac{P_{\Phi, \perp}(f_i)}{j_0^2} = \frac{1}{2} \delta f_i \langle\langle C_h \rangle\rangle \frac{P_{\perp}^B(f_i) + F(f_i)}{B_0^2},$$

где

$$F(f_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } f_0 < f < f_2, f_4 < f < f_2, \dots, \\ g_i(f) & \text{для } i = 0, 1, 2, \dots; \end{cases}$$

$f_i$  — выделенные частоты со статистически значимыми пиками в спектре мощности флюктуаций космических лучей. Модернизация модели тем более существенна, что появление в спектрах мощности флюктуаций космических лучей статистически значимых пиков свидетельствует, как правило, о перестройке межпланетного магнитного поля в окрестностях Земли<sup>41–43</sup>, возникновении возмущений межпланетной среды и магнитного поля Земли, и что самое существенное, является предвестником приближающихся ударных волн<sup>61</sup>. Причем, такое зондирование межпланетной среды можно проводить непрерывно на различных расстояниях от Земли — вопрос лишь в типе прибора, используемого для наблюдений.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многочисленных экспериментов и расчетов разработаны методы краткосрочного прогнозирования и диагностики ударных волн с помощью наблюдения наземных флюктуаций космических лучей с периодами от 12—15 до 420 минут, наиболее эффективно чувствующих приближающуюся к Земле ударную волну.

Как указывалось выше, эффект опережения космическими лучами возмущения межпланетной среды может быть легко объяснен: космические лучи чувствуют неоднородности на расстоянии их транспортного пробега для рассеяния, т. е. на расстоянии порядка  $10^{12}$ — $10^{13}$  см для частиц, регистрируемых нейтронными супермониторами и сцинтилляционными телескопами на поверхности Земли. При этом необходимо учитывать, что скорость космических лучей почти в тысячу раз больше скорости перемещения возмущения к Земле, следовательно, информацию о приближающемся возмущении космические лучи принесут практически мгновенно, в то время как возмущение будет еще «путешествовать» до Земли долгие часы. Так как энергии регистрируемых на Земле космических лучей находятся в достаточно широком диапазоне, то, следовательно, и расстояния, на которых будут чувствоватьться с помощью космических лучей приближающиеся к Земле обнаруженные возмущения, могут быть существенно различными: регистрируя частицы различных энергий, можно обнаруживать неоднородности вплоть до нескольких а.е.

Необходимо отметить, что возможности изучения флюктуаций этим не ограничиваются: проведенные исследования спектра мощности флюктуаций

космических лучей показали связь с уровнем возмущенности межпланетной среды не только выделенных колебаний на определенных частотах, но и всего спектра в целом — наклон спектра флюктуаций космических лучей постепенно увеличивается до максимального значения за несколько часов до прихода возмущения межпланетной среды к Земле, остается максимальным во время возмущения и уменьшается после его прохождения мимо Земли. Наклон спектра минимальен в спокойном солнечном ветре. Обнаруженный в ряде работ эффект опережения солнечных вспышек спектральными характеристиками космических лучей (изменение наклона спектра мощности флюктуаций космических лучей, появление выделенных пиков в спектрах) нуждается в дальнейшей тщательной проверке. Обсуждение возможных механизмов, приводящих к такому опережению (раскачка солнечной плазмы за сутки до вспышки, увеличение транспортного пробега частиц в условиях сильной регуляризации поля и т.д.), будет целесообразным только после точной идентификации каждой перестройки спектра с конкретной вспышкой, поскольку для целого ряда анализируемых событий инициатором такой перестройки могли быть как вспышки, предшествующие анализируемой, так и высокоскоростные потоки, исследование влияния которых на флюктуационные явления в космических лучах необходимо провести в ближайшее время. Если факт усиления мощности спектра на отдельных частотах при проходе мимо Земли границ секторов межпланетного магнитного поля не будет опровергнут (данных наблюдений таких эффектов пока крайне мало), то граница высокоскоростного потока, по-видимому, также должна сказываться при наблюдении флюктуаций космических лучей.

Перспективы дальнейшего изучения флюктуаций космических лучей и их использования для диагностики и прогнозирования мы связываем как с дальнейшим развитием теоретических исследований (кинетическая теория флюктуаций, приближения в рамках моделей изотропной и анизотропной диффузии, теория флюктуаций атмосферного и геомагнитного происхождения, теория возникновения флюктуаций в процессе генерации солнечных космических лучей и их распространения в короне, в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли), так и с расширением экспериментальных работ (регистрация флюктуаций космических лучей с помощью прецизионных приборов на поверхности Земли из различных асимптотических направлений, использования мировой сети нейтронных мониторов — как единого планетарного многонаправленного суперприбора, регистрация флюктуаций космических лучей с помощью многонаправленных супертелескопов на различных глубинах под Землей, более широкое использование наблюдаемых флюктуаций космических лучей на аэростатах, спутниках Земли и космических аппаратах) и с совершенствованием анализа экспериментальных данных (обработка информации в реальном масштабе времени независимыми методами, контролирующими друг друга: спектральный анализ, позволяющий получать информацию о наличии колебаний в исходных данных и их амплитуде, сдвиге фаз между процессами, спектрах когерентности, дисперсионный и авторегрессионный анализ, позволяющие точно оценивать истинность наблюдаемых флюктуаций и моделировать сам процесс в определенном приближении). При этом станет возможным решение ряда важных задач по количественной диагностике и прогнозированию таких событий, важных для космических исследований и их наземных приложений, как мощные солнечные вспышки, межпланетные ударные волны, возмущения, распространяющиеся в межпланетном пространстве.

Возможности исследования флюктуаций космических лучей не исчерпаны: вопросы количественных оценок состояния межпланетной среды по наблюдениям флюктуаций космических лучей на Земле дело близкого будущего. Решающим шагом в этом направлении стали работы А. Оуэнса, Д. Джокипи, Г. Крымского, М. Каца, Л. Бергамаско, А. Долгинова, И. Топтыгина и других, получивших прямые соотношения между спектральными оценками

флуктуаций космических лучей и межпланетного магнитного поля, так что, по-видимому, скоро оценки состояния ближнего космоса будут получаться на Земле так же непрерывно, как и регистрируются космические лучи. Первые шаги уже сделаны.

Предполагал ли Виктор Франц Гесс, отправляясь 7 августа 1912 г. в свой знаменитый полет на воздушном шаре, полет, положивший начало современной космофизике<sup>140</sup>, что через семьдесят лет открытые им лучи будут служить предвестниками космических бурь.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн  
АН СССР, Троицк (Московская обл.)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей.— М.: Наука, 1975, с. 462.
2. Дорман Л. И., Кац М. Е.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1974, т. 38, с. 1961.
3. Дорман Л. И., Кац М. Е.— В кн. Труды 5-го Международного семинара «Солнечные космические лучи и их проникновение в магнитосферу Земли».— Л.: ЛФТИ, 1973, с. 311.
4. Дорман Л. И. Космические лучи солнечного происхождения.— В кн. Итоги науки. Сер. «Астрофизика».— М.: ВНИТИ, 1978, т. 12, с. 155.
5. Дорман Л. И., Либин И. Я., Блох Я. Л. Спиритуационный метод исследования вариаций космических лучей.— М.: Наука, 1979, с. 107.
6. Шишов В. И.— Геомагн. и аэроном., 1966, т. 6, с. 223.
7. Дорман Л. И., Кац М. Е.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1972, т. 36, с. 2271.
8. Dorman L. I., Katz M. E., Steglik M.— In: Proc. of XV ICRC.— Plovdiv, Bulgaria, 1977, v. 3, p. 76.
9. Dorman L. I., Katz M. E.— Ibidem, v. 3, p. 76.
10. Owens A. J., Jokipii J. R.— J. Geophys. Res., 1972, v. 77, p. 6639.
11. Owens A. J., Jokipii J. R.— Ibidem, 1974, v. 79, p. 907.
12. Owens A. J.— Ibidem, p. 895.
13. Jokipii J. R., Owens A. J.— In: Proc. of XIV ICRC.— München, 1975, v. 3, p. 1107.
14. Owens A. J., Jokipii J. R.— Astrophys. J., 1973, v. 181, p. 147.
15. Jokipii J. R., Owens A. J.— Geophys. Res. Lett., 1974, v. 1, p. 329.
16. Blake D. H., Belcher J. W.— J. Geophys. Res., 1974, v. 79, p. 2891.
17. Jokipii J. R., Lee L. C.— Astrophys. J., 1972, v. 172, p. 739.
18. Jokipii J. R., Lee L. C.— Ibidem, 1973, v. 182, p. 317.
19. Neugebauer M., Wu C. S., Huba J.— J. Geophys. Res., 1978, v. 83, p. 1027.
20. Hedgecock P. C.— Solar Phys., 1975, v. 42, p. 427.
21. Большакова О. В., Мирошниченко Л. И., Троицкая В. А.— В кн. Космические лучи.— М.: Наука, 1978, № 19, с. 69.
22. Erdös G., Gömöri T., Kóta J., Owens A. J., Somogyi A. J., Varga A.— Цит. в<sup>8</sup> сб., v. 1, p. 441.
23. Duggal S. P.— Ibidem, v. 10, p. 430.
24. Owens A. J.— J. Geophys. Res., 1977, v. 82, p. 1066.
25. Owens A. J.— Ibidem, 1979, v. 84, p. 125.
26. Либин И. Я.— В кн. Космические лучи.— М.: Радио и связь: 1983, № 23, с. 28.
27. Owens A. J.— J. Geophys. Res., 1981, v. 84, p. 907.
28. Дорман Л. И., Кац М. Е., Стеглик М.— В кн. Труды Симпозиума КАПГ по солнечно-земной физике.— М.: ИЗМИРАН, 1976, с. 50.
29. Owens A. J.— In: Proc. of XVI ICRC.— Kyoto, Japan, 1979, v. 4, p. 14.
30. Вегтмако О. Л.— Ibidem, p. 163.
31. Owens A. J.— Ibidem, p. 14.
32. Дворников В. М., Крестьянников Ю. Я., Матюхин Ю. Г., Сергеев А. В.— В кн. Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.— М.: Наука, 1979, т. 49, с. 415.
33. Dorman L. I., Libin I. Ya., Khamirzov Kh. M.— Цит. в<sup>29</sup> сб., v. 11, p. 183.
34. Бакатанов В. И., Блох Я. Л., Воеводский А. В., Дадыкин В. Л., Дорман Л. И., Либин И. Я.— В кн. Космические лучи.— М.: Наука, 1975, № 15, с. 137.
35. Бакатанов В. М., Воеводский А. В., Козяриевский В. А., Михеев С. П., Степанов В. И., Тулупов Т. И.— Ibidem, с. 207.
36. Алексеев Е. Н., Бакатанов В. М., Воеводский А. В., Дадыкин В. Я., Козяриевский В. А., Коновалов Ю. Н., Маслов В. Н., Михеев С. П., Степанов В. М.— В кн. Космические лучи,— М.: Наука, 1974, № 14, с. 187.

37. Либин И. Я.—Геомагн. и аэрроном., 1984, т. 24, с. 823.
38. Ness N. F., Searce C. S., Santarano S.—J. Geophys. Res., 1966, v. 71, p. 3305.
39. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей.—М.: Наука, 1978.
40. Либин И. Я., Ситнов А. М., Старков Ф. А., Чеченов А. А., Юдахин К. Ф.—В кн. Космические лучи.—М.: Радио и связь, 1983, № 22, с. 62.
41. Либин И. Я.—Ibidem, с. 21.
42. Либин И. Я.—В кн. Труды ИЗМИРАН.—М.: ИЗМИРАН, 1980, с. 34.
43. Blokh Ya. L., Gulinsky O. V., Libin I. Ya.—In: Proc. of XVII ICRC.—Paris, 1981, v. 3, p. 39.
44. Бат М. Спектральный анализ в геофизике.—М.: Недра, 1980, с. 540.
45. Дорман Л. И., Пименов И. А., Сацук В. В. Математическое обеспечение исследований геофизических закономерностей на примере космических лучей.—М.: Наука, 1978, с. 152.
46. Дженкина Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения.—М.: Мир, 1972, т. 1, гл. 2, с. 600.
47. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.—М.: Мир, 1974, с. 464.
48. Graddock J. M.—J. Roy. Stat. Soc. Ser. A, 1957, v. 120, p. 387.
49. Троян В. М.—В кн. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн.—М.: Наука, 1977, с. 217.
50. Tisk L. J.—In: Proc. of IBM Science Computing Symposium.—New York, 1963, p. 265.
51. Коваленко В. А.—В кн. Солнечно-земная физика: Труды КАПГ.—Потсдам, 1984, № 15, с. 35.
52. Dhanju M. S., Sarabhai V. A.—Phys. Rev. Lett., 1967, v. 3, p. 252.
53. Dhanju M. S., Sarabhai V. A.—J. Geophys. Res., 1970, v. 5, p. 1795.
54. Attolini M. R., Galli I., Guidi I.—In: Proc. of XIII ICRC.—Denver, USA, 1973, v. 2, p. 795.
55. Antonucci E., Cini Castagnoli G., Dodero M.—Ibidem, p. 982.
56. Kozlov V. I., Churkov N. P.—In: Physik der Solarritter.—Potsdam, 1978, Bd. 9, S. 57.
57. Kozlov V. I., Kuzmin A. I., Krymsky G. F.—Цит. в <sup>54</sup> сб., v. 3, p. 939.
58. Kozlov V. I., Chirkov N. P.—Цит. в <sup>8</sup> сб., v. 4, p. 329.
59. Чирков Н. П., Ипатьев В. И.—Цит. в <sup>34</sup> сб., с. 100.
60. Козлов В. И. О структуре турбулентности крупномасштабных возмущений солнечного ветра по исследованию флуктуаций космических лучей: Препринт МГУ.—Москва, 1981, с. 120.
61. Козлов В. И.—Геомагнет. и аэрроном., 1980, т. 20, с. 391.
62. Козлов В. И., Чирков Н. П., Филиппов А. Т.—Изв. АН СССР. Сер. физ., 1976, т. 40, с. 638.
63. Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Козлов В. И.—Ibidem, 1974, т. 38, с. 1908.
64. Attolini M. R., Seccini S., Galli M.—Цит. в <sup>29</sup> сб., v. 4, p. 6a.
65. Attolini M. R., Seccini S., Galli M.—Ibidem, v. 4, p. 7.
66. Attolini M. R., Seccini S., Galli M.—Ibidem, p. 8.
67. Yasue S., Mori S., Ueno H., Nagashima K.—Ibidem, v. 3, p. 475.
68. Bergamasko O. L., Allessio S., Cini Castagnoli G.—Nuovo Cimento, Ser. C, 1979, v. 2, p. 53.
69. а) Munakata Y., Nagashima K.—Цит. в <sup>29</sup> сб., v. 3, p. 530.  
б) Antonova V. P., Zusmanovich A. G.—Цит. в <sup>43</sup> сб., v. 4, p. 193.  
в) Безродных И. П., Кузьмин В. А., Козлов В. И., Морозова Е. И., Шафер Ю. Г.—Геомагнет. и аэрроном., 1982, т. 22, с. 1016.
70. Transky I. A., Filippov A. I., Kozlov V. I.—Цит. в <sup>8</sup> сб., v. 5, p. 203.
71. Либин И. Я., Блох Я. Л., Юдахин К. Ф.—Геомагнет. и аэрроном., 1984, т. 24, с. 875.
72. Либин И. Я., Гулинский О. В. В кн. Космические лучи.—М.: Радио и связь, 1984, № 25, с. 5.
73. Иванов К. Г., Микерина Н. В., Завойкина А. И., Трешеткина В. М. Каталог вспышечных ситуаций 1966—1974 гг. применительно к межпланетным и магнитосферным возмущениям.—М.: ИЗМИРАН, 1979, с. 65.
74. Могилевский Э. И. Магнитные поля на Солнце и краткосрочный количественный прогноз солнечной активности: Препринт ИЗМИРАН № 16 (215).—М.: ИЗМИРАН, 1978, с. 36.
75. Kodama M., Sakai T., Tama E., Katoh M.—Цит. в <sup>13</sup> сб., v. 3, p. 1120a.
76. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Курочкин А. В., Лейков Н. Г., Лучков Б. И.—Письма ЖЭТФ, 1979, т. 30, с. 631.
77. Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Курочкин А. В., Лейков Н. Г., Лучков Б. И., Юркин Ю. Т. Ibidem, 1976, т. 24, с. 426.

78. Воронов С. А., Грачев В. М., Дмитренко В. В., Курочкин А. В., Лучков В. И., Улин С. Е., Юркин Ю. Т.— Косм. исслед., 1979, т. 17, с. 114.
79. Галпер А. М., Kirillov-Ugryumov V. G., Kotov Yu. D., Kurnosova L. V., Kurochkin A. V., Leikov N. G., Logachev V. I., Razorenov L. A., Fradkin M. I., Damble S., Kunte P., Sreekantan B. V.— Adv. Space Res., 1981, v. 1, p. 101.
80. a) Chichkova E. P., Iyudin A. F., Kirillov-Ugryumov V. G. et al.— Цит. в <sup>43</sup> сб., v. 4, p. 200.  
б) Chichkova E. P., Iyudin A. F., Kotov Yu. D. et al.— Ibidem, p. 248.
81. Абранин Э. П., Базелян А. Л., Быстров М. В., Кобрин М. С. Снегирев С. Д.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 4, с. 559.
82. Кобрин М. М., Коршунов А. И., Арбузов С. И., Пахомов В. В., Фридман В. М.— Астрон. ж., 1976, т. 53, с. 789.
83. Гальпер А. М., Грачев В. М., Дмитренко В. В.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1977, т. 41, с. 1765.
84. Мирошниченко Л. И. Солнечные космические лучи.— М.: Наука, 1968.
85. Блох Г. М., Кужевский Б. М., Либин И. Я.— Геомагнет. и аэроном., 1984, т. 24, с. 41.
86. Swinson D. B.— World Data Centr. Ser. A: Solar-Terr. Phys. Rept., 1982, v. 83, p. 225.
87. Nasarova M. N., Pereyaslava N. K., Petrenko I. E.— Ibidem, p. 206.
88. Avdyushin S. I., Pereyaslava N. K., Kulagin Yu. M.— Ibidem, p. 208.
89. Williams J. A., Donnelly R. F.— Ibidem, p. 214.
90. Веселовский И. С. Исследование космического пространства.— М.: Наука, 1974, с. 300.
91. Martinez N. I.— In: Proc. of XII ICRC.— Hobart, Australia, 1971, v. 5, p. 919.
92. Soleman P. J.— J. Geophys. Res., 1974, v. 79, p. 2826.
93. Голынская Р. М., Беленькая Б. Н., Скорокход Е. П., Савун О. И.— Цит. в <sup>34</sup> сб., с. 15.
94. Allum F. R., Palmeira R.A.K., Rao U. R.— Цит. в <sup>91</sup> сб., v. 2, p. 532.
95. Palmeira R. A. K., Allum F. R.— Proc. Solar Phys., 1973, v. 30, p. 243.
96. Обридко В. Н., Фельдштейн Я. И., Шельтияг Б. Д.— В кн. Проблемы космической электродинамики.— М.: ИЗМИРАН, 1981, с. 12.
97. Коваленко В. А., Малышкин В. Н.— В кн. Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.— Якутск: ИКФИА, 1975, с. 109.— (Тр. ИКФИА. Т. 37).
98. Dorman L. I., Libin I. Ya.— Geofisica Intern. (Mexico), 1980, v. 19, No. 2, p. 85.
99. Russel C. T.— In: Solar Wind; NASA SP-308.— Washington, USA, 1972, p. 365.
100. Брандт Дж. Солнечный ветер.— М.: Мир, 1973, с. 208.
101. Долгинов А. З., Топтыгин М. Н.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1968, т. 32, с. 1821.
102. Тверской Б. А.— В кн. Ядерная космическая физика.— Л.: ЛФТИ, 1969, с. 159.
103. Benson R., Duller N. M., Green P. J.— Geophys. Res. Lett., 1981, v. 8, p. 2.
104. Kato M., Sakai T., Wada M.— Цит. в <sup>29</sup> сб., v. 4, p. 1.
105. Charakchyan T. N., Basilevskaya G. A., Богоявленский Л. Р.— World Data Cent. Ser. A: Solar-Terr. Phys. Rept., 1982, v. 83, p. 228.
106. Fujii Z., Fujimoto K., Sakakibara S., Ueno H., Nagashima K.— Ibidem, p. 280.
107. Libin I. Ya., Blokh G. M., Kuzevsky B. M., Lemberger A. M.— In: Proc. of XVIII ICRC.— Bangalore, India, 1983, v. 4, p. 115.
108. a) Dhananjay M. S.— Planet and Space Sci., 1970, v. 18, p. 1719.  
б) Блох Я. Л., Дорман Л. И., Либин И. Я., Янке В. Г.— В кн. Космические лучи.— М.: Наука, 1976, № 16, с. 32.
109. Либин И. Я., Гулинский О. В.— В кн. Космические лучи.— М.: Радио и связь, 1984, № 25, с. 37.
110. Либин И. Я., Гулинский О. В. Флуктуационные явления в космических лучах по данным многонаправленного спиритилляционного супертелескопа ИЗМИРАН: Препринт ИЗМИРАН № 30(258).— М.: ИЗМИРАН, 1979.
111. Dorman L. I., Libin I. Ya.— Astrophys. and Space Science, 1980, v. 73, p. 337.
112. Lanzerotti L. J., Robbins M. F., Venkatasan D. V.— Цит. в <sup>54</sup> сб., v. 2, p. 789.
113. Fujii Z., Mori S., Yasue S., Nagashima K.— Ibidem, p. 785.
114. a) Libin I. Ya.— Цит. в <sup>43</sup> сб., v. 4, p. 43.  
б) Libin I. Ya., Dorman L. I., Gulinsky O. V., Yudakhin K. F.— Ibidem, v. 3, p. 231.

115. Крымский Г. Ф.—Изв. АН СССР, Сер. физ., 1969, т. 33, с. 1853.
116. Ваганс Е., King I. N.—Цит. в <sup>13</sup> сб., в. 3, р. 1036.
117. Григорьев В. Г., Самсонов И. С., Самсонова З. И.—Изв. АН СССР, Сер. физ., 1978, т. 42, с. 1032.
118. Кузьмин И. И. Вариации космических лучей и солнечная активность.—М.: Наука, 1968.
119. Крымский Г. Ф., Мамрукова В. П., Шафер Г. В.—В кн. Бюлл. НТИ.—Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1976, с. 31.
120. Рабинович М. И.—УФН, 1978, т. 125, с. 123.
121. Васильев В. Н., Топтыгин И. Н., Чирков А. Г.—Косм. исслед. 1980, т. 18, с. 556.
122. Белов А. В., Блох Я. Л., Гущина Р. Т. и др.—Изв. АН СССР. Сер. физ., 1979, т. 43, с. 2512.
123. Рагкер Е. Н.—J. Geophys. Res., 1964, v. 69, p. 1755.
124. Дорман Л. И.—В кн. Космические лучи.—М.: Наука, 1980, № 24, с. 5.
125. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях.—М.: Наука, 1983, с. 302.
126. Чистяков В. Ф.—В кн. Проблемы космической физики: Междувед. сб.—Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974, № 9, с. 19.
127. Чистяков В. Ф.—В кн. Исследование явлений на Солнце.—Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975, с. 14.
128. Чистяков В. Ф.—В кн. Динамические процессы на Солнце.—Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978, с. 27.
129. а) Арубузов С. И., Кобрии М. М., Коршунов А. И., Пахомов В. В. Проокофьева Н. А., Фридман В. М.—В кн. физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей.—М.: Наука, 1975, т. 1, с. 83.  
б) Абраменко В. И., Ербашев Н. Н., Цветков Л. И.—Изв. Крымской астрофиз. обс., 1982, т. 65, с. 87.
130. а) Котов V. A., Sevegnu A. B., Tsarp T. T.—Mon. Not. RAS, 1978, v. 183, p. 61.  
б) Владимиристий Б. М., Бобова В. П., Решен В. Н., Веретениников В. К.—Изв. Крымской астрофиз. обс., 1981, т. 64, с. 132.
131. Hill H. A., Stebbins R. T., Grewin T. M.—In: Atomic Masses and Fundamental Constants.—N. Y., 1979, v. 5, p. 622.
132. Стародубцев С. А., Филиппов А. Т., Чирков Н. П.—Астрон. ж. 1982, т. 59, с. 1229.
133. Дорман Л. И., Кац М. Е., Носов С. Ф., Стеглик М., Юхимук А. К.—Изв. АН СССР. Сер. физ., 1983, т. 47, с. 1861.
134. Bergamasko L., Osborne A. R., Alessio S., Cini Castagnoli G.—J. Geophys. Res., Ser. A, 1980, v. 85, p. 4288.
135. Bergamasko L., Cini Castagnoli G., Periale L.—Цит. в <sup>43</sup> сб., в. 9, р. 218.
136. Коваленко В. А. Солнечный ветер.—М.: Наука, 1983, с. 272.
137. Солнечная и солнечно-земная физика/Под ред. Абруцека, Ш. Дюрана.—М.: Мир, 1980, с. 254.
138. Коваленко В. А., Коржов Н. П., Малышкин В. Н.—Астрон. ж., 1976, т. 53, с. 295.
139. Гибсон Э. Спокойное Солнце.—М.: Мир, 1977, с. 408.
140. Дорман И. В. Космические лучи.—М.: Наука, 1981, с. 192.