

Применение этого метода к наблюдениям Солнца на РАТАН-600 позволило, в частности, показать, что крупномасштабные магнитные поля флоккул в верхней хромосфере практически такие же по величине и знаку, что и на уровне фотосферы.

2. Использование теории теплового циклотронного радиоизлучения солнечной короны в сильных магнитных полях пятен, развитой Железняковым и Злотник, позволило отождествить коротковолновую часть излучения ядра локальных источников со свечением корональных электронов на третьей гармонике гирочастоты. Наблюдения спектров этих ядер на РАТАН-600 позволяют находить граничную длину волны λ' генерации третьей гармоники и тем самым измерять поле в основании короны над пятном (на высотах около 2000 км над фотосферой):

$$B \text{ (Гс)} = \frac{3570}{\lambda' \text{ (см)}}.$$

Была обнаружена хорошая связь этих полей с напряженностями поля на уровне фотосферы, а также показано, что поле в короне может достигать таких больших величин, как 2000 Гс и выше.

3. Явление изменения знака поляризации излучения ядер локальных источников с длиной волны, проявляющееся при определенных долготах активных областей, было использовано для измерений напряженности поля в областях квазипоперечного распространения в короне. Применяя теорию распространения радиоволн, развитую Козном и Железняковым и Злотник, можно установить связь граничной длины волны λ_t смены знака поляризации с напряженностью магнитного поля в области поперечного поля:

$$B \text{ (Гс)} = \frac{157}{\lambda_t \sqrt{N L_B \lambda_t}},$$

где единицы измерения характерного масштаба поля $[L_B] \approx 10^{10}$ см и электронной концентрации $[N] \approx 10^8$ см⁻³. Измеренные по этой формуле магнитные поля на высотах (50—100) · 10³ км составляют десятки эрстед, в целом согласуясь с картиной потенциального характера поля в короне.

Особенный интерес представляют результаты комплексных исследований активных областей, когда радиоастрономические измерения магнитных полей всеми перечисленными методами сочетались с наблюдениями той же области в других диапазонах волн. Ряд таких комплексных наблюдений удалось провести в рамках международной программы Года Солнечного Максимума. Интересным примером может служить исследование арок заливмовой корональной конденсации, наблюдавшейся 19 ноября 1980 г. совместно с Горной астрономической станцией в Кисловодске. В частности, было показано, что магнитное поле внутри корональной арки и вне ее на той же высоте — одного порядка (около 20 Гс на высоте 75 000 км).

23 [165+747] (048)

Л. И. Дорман. Солнце и галактические космические лучи. Солнце не только является генератором мощных электромагнитных излучений и частиц высокой энергии (солнечных космических лучей — СКЛ), но также существенно воздействует на интенсивность, анизотропию и спектр частиц высокой энергии, приходящих из Галактики (галактических космических лучей — ГКЛ). В результате такой модуляции возникают локальные эффекты, формируемые в сравнительно небольшом объеме размерами ~ нескольких а. е. (форбуш-понижения ГКЛ, солнечная анизотропия, ложная «звездная» анизотропия, 27-дневные вариации, эффекты возрастания ГКЛ перед приходом к Земле мощных межпланетных ударных волн, сцинтилляции ГКЛ), а также глобальные эффекты, формируемые всей областью солнечного ветра размерами ~ многих десятков а. е. (11-летние и 22-летние вариации ГКЛ) ¹⁻⁶.

Модуляционные эффекты относятся к классу внеземных вариаций КЛ. В вариациях, наблюдаемых с помощью наземных приборов для непрерывной регистрации КЛ (нейтронных мониторов и супермониторов, мюонных телескопов и т. д.) ⁵, содержится сумма всех трех классов: атмосферного ⁷, магнитосферного ⁸ и внеземного происхождения. Для их разделения и выделения внеземных вариаций КЛ используется спектрографический метод анализа данных синхронных измерений одновременно нескольких компонент с различной чувствительностью к первичным КЛ (с различными коэффициентами связи; см. гл. VIII в ⁹). С этой целью в Советском Союзе в 1968—1975 гг. было создано два горных спектрографа КЛ, Саянский и Эльбрусский, пока единственные в мире. С их помощью удается выделить вариации магнитосферного происхождения, ввести соответствующие поправки в данные наблюдений на мировой сети станций и найти планетарное распределение проявлений во вторичных компонентах внеземных вариаций первичных КЛ. Затем с помощью коэффициентов связи и результатов расче-

тов траекторий частиц в реальном геомагнитном поле производится соответствующий пересчет для каждой станции за пределы магнитосферы Земли. Найденное для каждого момента времени планетарное распределение ГЛ подвергается сферическому анализу и находятся временные изменения плотности ГЛ (изотропной составляющей интенсивности) и параметров сферических гармоник (см. ^{4,6,10}, гл. IX в ⁹). Таким образом, при такой процедуре мировая сеть станций (около сотни) используется в качестве единого многонаправленного планетарного прибора. Получаемые при этом результаты обладают исключительно высокой точностью и надежностью. Они являются основой для получения детальной информации как о локальных, так и глобальных модуляционных эффектах ГЛ.

В последние годы таким образом удалось тщательно исследовать процесс взаимодействия вспышечной плазмы и высокоскоростных потоков солнечного ветра с ГЛ, получить довольно полную картину формирования суточной и полусуточной компонент вектора анизотропии, радиального и поперечного градиентов. 27-дневной вариации ГЛ.

Значительно более сложным представляется исследование глобальной модуляции: 11-летней и 22-летней вариаций интенсивности и анизотропии ГЛ. Дело здесь в том, что за эти вариации ответственны связанные с циклической деятельностью Солнца процессы в межпланетном пространстве на столь больших расстояниях от Земли (как в радиальном, так и в поперечном по отношению к гелиоэкваториальной плоскости направлениях), что прямая информация о них практически отсутствует и вряд ли будет получена в ближайшие годы. Однако путем сравнения теоретически ожидаемых эффектов с наблюдаемой глобальной модуляцией удастся получить некоторую косвенную информацию об этих процессах.

Прежде всего, еще в 1967 г. удалось выяснить, что связь между долговременной вариацией ГЛ и солнечной активностью не является линейной, а носит сложный гистерезисный характер, что обусловлено большими размерами области глобальной модуляции ГЛ (50—100 а.е.) ¹¹. Эта связь оказалась существенно различной для частиц ГЛ малой жесткости (~ 1 ГВ, наблюдения на космических аппаратах и в стратосфере), средней (~ 10 ГВ, наблюдения с помощью нейтронных мониторов) и высокой жесткости (~ 100 ГВ, наземные и подземные наблюдения с помощью мюонных телескопов). Для объяснения этих особенностей было предположено, что размеры солнечного ветра довольно большие (50—100 а.е.), и поэтому изменения электромагнитных условий в межпланетном пространстве (определяющие глобальную модуляцию ГЛ) происходят со значительным запаздыванием по отношению к процессам на Солнце. Поскольку напряженность межпланетного магнитного поля убывает с удалением от Солнца, то эффективные размеры области модуляции уменьшаются с увеличением жесткости частиц. В соответствии с этими представлениями были проведены в рамках теории анизотропной диффузии ГЛ в межпланетном пространстве ¹² численные расчеты на ЭВМ ожидаемой глобальной модуляции ¹³. В то время считалось, что магнитное поле в межпланетном пространстве имеет секторную структуру, причем при переходе от одного сектора к другому направление силовых линий меняется на противоположное. Поэтому недиагональные компоненты тензора анизотропной диффузии также будут менять знак и при осреднении за периоды, большие времени обращения Солнца вокруг своей оси, ими можно пренебречь. Хотя в первом приближении теория правильно объясняла основные закономерности глобальной модуляции, отмечалось некоторое расхождение теории с данными наблюдений, ставшее существенным после переполюсовки общего магнитного поля Солнца в 1969—1970 гг., когда интенсивность ГЛ возросла со временем гораздо быстрее, чем ожидалось ¹⁴ (см. также обзор в ¹⁵).

Стало ясно, что необходимо учесть влияние общего поля Солнца и его переполюсовки на глобальную модуляцию ГЛ. Действительно, из-за солнечного ветра общее поле вращающегося Солнца вытягивается в межпланетное пространство в виде спиралей Архимеда так, что если к северу от экваториальной области (где поле из-за влияния активных областей имеет секторную структуру) силовые линии выходят из Солнца, то к югу от этой области — входят. Примерно раз в 11 лет происходит переполюсовка общего поля, так что полный цикл составляет около 22 лет. Поэтому недиагональные компоненты тензора анизотропной диффузии выше и ниже экваториальной области отличны от нуля, возникают дрейфовые потоки из-за наличия поперечного и радиального градиентов плотности ГЛ. В результате для протонов и ядер ГЛ в 1947—1957 и 1971—1981 гг. глобальная модуляция будет слабее (за счет дрейфовых потоков, направленных к экваториальной области), а вектор анизотропии будет смещаться к более поздним часам; в 1958—1970 и 1982—1993 гг. модуляция усилится, а вектор анизотропии сместится к более ранним часам ^{16, 17}. Для галактических электронов и антипротонов ожидается обратная ситуация. Важно подчеркнуть, что в альтернативной модели Ahluwalia ¹⁸ пересоединения силовых линий гелиомагнитосферы и галактического магнитного поля эффект не должен зависеть от знака заряда частиц.

и не должна меняться фаза вектора анизотропии. Модель пересоединения может давать лишь некоторый добавочный эффект к рассмотренному выше основному механизму глобальной модуляции за счет дрейфовых потоков в рамках теории анизотропной диффузии.

Поскольку размеры области модуляции значительны (50—100 а. е.; это следует из наземных наблюдений гистерезисных эффектов, а также из прямых измерений радиального градиента ГКЛ по данным синхронных измерений на различных космических аппаратах), то необходим учет нелинейного взаимодействия солнечного ветра и космических лучей (предсказывается радиальное торможение солнечного ветра и поперечное обжатие скоростных потоков космическими лучами)^{19,20}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорман Л. И. Вариации космических лучей.— М.: Гостехиздат, 1957.
2. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса.— М.: Наука, 1963.
3. Паркер Е. Н. Динамические процессы в межпланетной среде.— М.: Мир, 1965.
4. Крымский Г. Ф. Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве.— М.: Наука, 1969.
5. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей.— М.: Наука, 1975.
6. Дорман Л. И. Вариации галактических космических лучей.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975.
7. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей.— М.: Наука, 1972.
8. Дорман Л. И., Смирнов В. С., Тясто М. И. Космические лучи в магнитном поле Земли.— М.: Физматгиз, 1971.
9. Dorman L. I. Principles of Cosmic Ray Astrophysics and Geophysics.— Amsterdam: D. Reidel Publ. Co. (in press).
10. Dorman L. I. Cosmic Rays: Variations and Space Explorations.— Amsterdam: North-Holland, 1974.
11. Дорман И. В. Дорман Л. И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1967, т. 31, с. 1273.
12. Dorman L. I. — In: Proc. of 9th Intern. Cosmic Ray Conference — Lnd., 1965.— V. 1, p. 292.
13. Dorman L. I., Milovidova N. P. — In: Proc. of 13th Intern. Cosmic Ray Conference.— Denver, 1973.— V. 2, p. 713.
14. Чарахчян А. Н., Базилевская Г. А., Свиржевская А. К., Стожков Ю. И., Чарахчян Т. Н. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1973, т. 37, с. 1258.
15. Чарахчян А. Н., Чарахчян Т. Н. Изменчивость общего магнитного поля Солнца как источник модуляции космических лучей: Препринт ФИАН СССР.— Москва, 1981.
16. Алания М. В., Дорман Л. И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1979, т. 43, № 4.
17. Alania M. V., Dorman L. I. — In: Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference.— Kyoto, 1979.— V. 3, p. 57.
18. Ahluwalia H. S. — Ibid.— V. 12, p. 216.
19. Дорман И. В., Дорман Л. И. — Геомагн. и аэроном., 1968, т. 8, с. 817. 1008; Изв. АН СССР, Сер. физ., 1969, т. 33, с. 1908.
20. Vabayan V. Kh., Dorman L. I. — In: Proc. of 15th Intern. Cosmic Ray Conference.— Plovdiv, 1977.— V. 3, p. 107; Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference.— Kyoto, 1979.— V. 3, p. 117, 123; Proc. of Intern. Cosmic Ray Conference.— Paris, 1981.— V. 3, p. 373.