

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 523.165

БАГДАСАРЯН МИША БАГОЕВИЧ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДУЛЯЦИИ  
ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных  
частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ереван - 1983

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор Л.И.Дорман (ИЗМИРАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Т.Н.Чарахчян (НИИЯФ МГУ)

кандидат физико-математических наук  
М.Е.Кац (Институт геофизики АН УССР)

Ведущая организация: ФИАН СССР.

Защита состоится "22" ~~Июля~~ 1983 г. в 14<sup>00</sup> часов  
на заседании Специализированного Совета Д.034.03.01  
по присуждению ученой степени доктора физико-математических  
наук при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван,  
ул.Маркаряна 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1983 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета,  
кандидат физ.-мат.наук

*В.А.Шахбазян*

В.А.Шахбазян

## I. Общая характеристика работы

Диссертация посвящена теоретическому исследованию задачи о нестационарной модуляции галактических космических лучей (ГКЛ). Проведено сравнение теоретических расчетов с наблюдательными данными.

Актуальность темы. В теории распространения космических лучей в межпланетном пространстве, заполненном движущейся от Солнца плазмой солнечного ветра, большую роль играют нестационарные процессы, обуславливающие электромагнитные состояния в межпланетной среде.

Изучение процессов распространения космических лучей в солнечной системе является одним из актуальных направлений определения физических условий в ней, структуры и динамики солнечного ветра, конфигураций и характеристик межпланетных ударных волн и т.д.

В настоящее время большое значение приобретает исследование распространения космических лучей для различных моделей солнечного ветра, с учетом современных представлений о взаимодействии солнечного ветра с межзвездной средой. Значительный интерес представляет выяснения особенностей формирования пространственно-временного распределения интенсивности космических лучей в зависимости от физических условий на границе солнечного ветра.

Цель работы заключается в исследовании закономерностей распространения ГКЛ в межпланетном пространстве и установлении количественных соотношений, характеризующих взаимодействие заряженных космических частиц с межпланетными магнитными полями, а именно: исследование форбуш-понижений и возрастание интенсив-

ности космических лучей перед ними, а также восстановления интенсивности после фобуш-понижений на основе диффузионно-конвекционного уравнения, интерпретация некоторых наблюдаемых данных.

Новизна работы. Впервые на основе нестационарного диффузионно-конвекционного уравнения решены краевые задачи модуляции космических лучей с движущейся границей в сферически-симметричном случае и в случае наличия поперечной диффузии. Аналитические решения этих задач применены для определения плотности ГКЛ в периоды возрастания солнечной активности. Полученные решения позволяют оценить также размеры модулирующего объема, формирующего II-летние вариации.

Впервые на основе автомоделного решения указанного уравнения рассчитаны некоторые характеристики фобуш-эффектов в межпланетном пространстве, которые согласуются с наблюдаемыми данными.

Впервые решено нестационарное диффузионно-конвекционное при распространении последовательных ударных волн в межпланетном пространстве с граничными условиями на движущихся границах при наличии поперечной диффузии. Показано, что между ударными волнами должно возникать некоторое возрастание интенсивности космических лучей на фоне фобуш-понижения.

Научная и практическая ценность. Результаты работы могут служить эффективным средством для получения информации о физических параметрах межпланетной среды в периоды возрастания солнечной активности. Расчеты, проведенные в диссертации, могут быть использованы при интерпретации наблюдательных данных по интенсивности ГКЛ, в частности, для объяснения "ступенчатой" вариации космических лучей в II-летнем цикле, открытой А.М.Чарахчяном и Т.Н.Чарахчьян.

Защищаемые положения: I) Теоретические результаты решений нестационарного диффузионно-конвекционного уравнения с учетом адиабатического изменения энергии частиц ГКЛ в различных моделях, учитывающих, в частности, изменение коэффициента диффузии с гелиоцентрическим расстоянием.

2) Результаты модельных расчетов ожидаемых фобуш-понижений и предпovyшений интенсивности ГКЛ на основе автомоделного решения нестационарного уравнения переноса.

3) Результаты расчетов изменения интенсивности ГКЛ в модели, учитывающей поперечную диффузию при прохождении межпланетной ударной волны.

4) Комплексную модель, описывающую модуляции ГКЛ при прохождении в межпланетном пространстве нескольких последовательных полупрозрачных магнитных поршней.

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлялись на всесоюзных и международных конференциях по космическим лучам (Москва 1971г., Якутск 1977г., Ереван 1979 г., Киото 1979г., Бангладуру 1983 г.), на симпозиуме КАПГ (Киев 1978 г.).

Работы докладывались на семинарах в ЕРФИ, ИЗМИРАН-е, институте геофизики АН УССР.

Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Содержит 95 страниц машинного текста, одну таблицу, 24 рисунка и список литературы из 84 наименований.

## II. Краткое содержание работы

Во введении приведены исторические и современные представления о механизмах фобуш-эффекта и краткое содержание диссертации.

В первой главе рассматривается разработка методов решения нестационарного диффузионно-конвекционного уравнения с граничными условиями на движущихся границах.

В § 1 формируется исходное диффузионно-конвекционное уравнение в различных представлениях.

В § 2 рассматривается нестационарная модель, в которой фронт солнечного ветра, движущийся с постоянной скоростью, модулирует космические лучи с не зависящим от расстояния и энергии коэффициентом диффузии.

При решении этой краевой задачи с граничным условием на движущейся границе, использован метод, приводящий к интегральным преобразованиям Лапласа, который, ввиду сложности обратного преобразования, дает решения не удобные для численных расчетов. В диссертации заменой переменных задача приведена к задаче с неподвижной границей и полученные методом разделения переменных решения пригодны для численных расчетов.

В § 3 решена аналогичная задача, но с коэффициентом диффузии, прямо пропорциональным гелиоцентрическому расстоянию. В этом случае задача сводится к решению задачи о собственных функциях, а решение выражается в специальных функциях Уиттекера

Доказывается ортогональность функций по индексу

При определенных, характерных значениях физических параметров решение задачи выражается через ортогональные функции Бесселя.

В § 4 для нестационарного диффузионно-конвекционного уравнения решение находится в двух областях, разделенных движущейся границей.

На основе найденного решения исследуется воздействие "ступенчатых" изменений солнечной активности, приводящее к "ступенчатым" изменениям скорости солнечного ветра и транспортного пробега

для рассеяния частиц космических лучей в межпланетном пространстве, на интенсивность галактических космических лучей. Получены аналитические решения в виде рядов, с помощью которых можно оценить размеры модуляционного объема, формирующего II-летние вариации космических лучей. Развитый метод решения, в частности, при проведении соответствующих численных расчетов, может дать интерпретацию так называемой "ступенчатой" вариации космических лучей в II-летнем цикле, открытой А.М.Чарахчяном и Т.Н.Чарахчян.

Во второй главе рассматривается нестационарная модуляция космических лучей межпланетными ударными волнами.

В § 5 решается задача модуляции космических лучей в межпланетном пространстве сферически-симметричной ударной волной, в предположении изотропного характера диффузии. Принимается во внимание, что ударная волна имеет два ударных фронта.

Нестационарное диффузионно-конвекционное уравнение сведено к автотомельному и получены аналитические решения в трех областях, с граничными условиями на двух движущихся границах, расстояние между которыми увеличивается пропорционально времени. Проведенные численные расчеты аналитических решений показывают возрастание интенсивности космических лучей перед фронтом ударной волны, а также резкое понижение интенсивности после прохождения волны. Приведены графики зависимости относительной плотности космических лучей от расстояния и времени для различных значений коэффициента диффузии внутри и вне ударной волны. Как и следовало ожидать, время восстановления интенсивности космических лучей в этой модели больше, чем наблюдаемое, что объясняется сферической симметрией задачи.

В § 6 в нестационарном диффузионно-конвекционном уравнении добавляется член, учитывающий поперечную диффузию в некотором

шаровом секторе. В этом случае, хотя нестационарное диффузионно-конвекционное уравнение становится неоднородным, удается его привести к автомодельному и получить аналитические решения во всем моделирующем объеме.

Из численных расчетов видно, что возрастание и быстрое восстановление интенсивности космических лучей в процессе форбуш-понижения хорошо согласуется с наблюдаемыми данными. Приведены графики временной зависимости относительной плотности к.л. на орбите Земли. В § 7 рассматривается более сложная модель из нескольких последовательных полупрозрачных магнитных поршней (движущихся ударных волн с учетом поперечной диффузии в конусе), для которой также удается получить автомодельные решения, позволяющие объяснить процессы суперпозиции эффектов возрастания и форбуш-понижений с учетом ускорения и торможения космических лучей между поршнями (в зависимости от относительной скорости движения магнитных поршней). Учтена поперечная диффузия во всем объеме конуса, охватывающего магнитные поршни, и проведен анализ найденных аналитических решений уравнения, соответствующего предложенной модели. Сравнение с данными наблюдений показывает пригодность этой модели для объяснения ряда сложных уникальных событий в космических лучах, таких, как например, в июле 1959 г. или в августе 1972 г.

В третьей главе проводится сравнение теоретических расчетов с наблюдаемыми событиями, происходящими в космических лучах во время солнечных вспышек. Современная усовершенствованная методика комплексного анализа данных наблюдений позволяет провести исследование конкретных типов вариаций космических лучей более полно, что дает возможность обосновать справедливость разработанных теоретических моделей. В § 8

приведена статистика экспериментальных наблюдений о возрастании интенсивности галактических космических лучей перед магнитными бурями, вызываемыми ударными волнами, которая показывает, что во всех случаях, когда Земля захватывается передним фронтом ударной волны, существует возрастание интенсивности космических лучей перед форбуш-понижением. Этот факт хорошо согласуется с теоретическими расчетами данной работы, так как во всех рассмотренных нами случаях Земля захватывается передним фронтом ударной волны и, как показано в §§ 5, 6 и 7, существует возрастание интенсивности космических лучей, амплитуда которой пропорциональна степени сжатия магнитного поля между фронтами ударной волны. В § 9 анализируются наблюдательные данные событий, происшедших в космических лучах в июле 1959 г. и августе 1972 г. На основе модели, разработанной в §§ 6,7, эти явления интерпретируются как суперпозиция возрастания и форбуш-понижения интенсивности космических лучей из-за наличия в межпланетном пространстве последовательных ударных волн. Показано, что возрастание на фоне форбуш-понижений также согласуется с моделью, приведенной в § 7. В § 10 данные о событиях в феврале и мае 1978 г. сравниваются с результатами расчетов §§ 5,6. Показано, что максимум амплитуды форбуш-понижения движется в межпланетном пространстве со скоростью движения ударной волны.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В приложениях дается способ нахождения решения рассматриваемого в § I нестационарного диффузионно-конвекционного уравнения, как функции от переменной комбинации переменных, позволяющей удовлетворить краевым условиям.

### III. Основные результаты и выводы

I. Впервые получено аналитическое решение нестационарного уравнения диффузии с учетом адиабатического охлаждения и конвек-

ции в сферически-симметричном случае при постоянном коэффициенте диффузии с граничными условиями на движущейся границе. Найденное решение позволяет в частности объяснить изменение интенсивности галактических космических лучей при скачкообразном изменении солнечной активности.

2. Впервые решено нестационарное диффузионно-конвекционное уравнение в случае пропорциональной зависимости коэффициента диффузии от гелиоцентрического расстояния с граничными условиями на движущейся границе. Разработан метод решения, с помощью которого задачу удастся свести к задаче с неподвижной границей. Показано, что в этом случае переменные разделяются и решение можно найти путем решения краевой задачи о собственных значениях. Полученное решение позволяет в частности, объяснить вариации галактических космических лучей, обусловленные плавным изменением солнечной активности с учетом возможного движения границы между солнечным ветром и межзвездной средой.

3. Впервые решено нестационарное диффузионно-конвекционное уравнение типа Фоккера-Планка в двух областях, границы которых удаляются от Солнца линейно со временем. Полученные в виде рядов решения дают возможность оценить размеры модуляционного объема, формирующего 11-летние вариации космических лучей. На основе развитого метода решения появляется возможность интерпретировать нестационарную долговременную модуляцию космических лучей в межпланетном пространстве, в частности, объяснить так называемую ступенчатую вариацию космических лучей в 11-летнем цикле, открытую А.Н.Чарахчьяном и Т.Н.Чарахчьян.

4. Впервые показано, что нестационарное диффузионно-конвекционное уравнение при прямой пропорциональности коэффициента диффузии расстоянию от Солнца можно свести к автомодельному и приме-

нить его к описанию поведения галактических космических лучей, когда в межпланетном пространстве распространяется всплывающая сферически-симметричная ударная волна. Получены аналитические решения, удовлетворяющие граничным условиям на движущихся границах. Численные расчеты на ЭВМ аналитических решений показывают, что перед фобуш-эффектом интенсивность галактических космических лучей возрастает на 1-3%, после чего происходит резкое понижение интенсивности.

5. Для объяснения особенностей восстановления после фобуш-понижений, в нестационарное уравнение диффузии вводится дополнительный член, учитывающий поперечную диффузию. Показано, что и в этом случае удастся свести задачу к автомодельной и получить аналитическое решение. Полученные решения объясняют, в частности, следующие наблюдаемые эффекты: а) увеличение потока космических лучей перед приходом поршня (ударной волны, движущейся в сферическом секторе); б) резкое падение интенсивности после захвата Земли ударной волной и в) постепенное восстановление интенсивности космических лучей после фобуш-понижения.

6. Предложена и аналитически исследована комплексная модель, описывающая модуляцию галактических космических лучей при движении в межпланетном пространстве нескольких последовательных полупрозрачных магнитных поршней с граничными условиями на нескольких движущихся границах. Показано, что и для такой сложной модели удастся получить автомодельные решения, позволяющие объяснить явления суперпозиции эффектов возрастания и фобуш-понижения с учетом процессов изменения энергии и выметания космических лучей перед поршнями и в областях между ними (в зависимости от соотношения между скоростями движения магнитных поршней).

Сравнение с данными наблюдений показывает, что разработанная

комплексная аналитическая модель хорошо объясняет ряд сложных уникальных событий в космических лучах, таких, как например, в июле 1959 г. или в августе 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Б.Багдасарян, А.В.Белов, Л.И.Дорман и Б.А.Шахов. Некоторые вопросы теории модуляционных эффектов космических лучей. "Изв.АН СССР", сер. физ., т. XXV, № 12, 1971, с. 2492-2497
2. М.Б.Багдасарян, Р.Т.Гущина, Л.И.Дорман, И.А.Пименов, В.Г.Янке. Некоторые вопросы теории вариаций космических лучей. Сб. "Космические лучи", изд-во "Наука", М., 1974, с. 55-85.
3. M.B. Bagdasaryan, L.I. Dorman Nonstationary Interplanetary Models of Spherically Symmetric Modulation Including the Conditions at the Moving Boundary Relevant to the 11-year Cosmic Ray Conference, Kyoto, 1979, 3, p. 122.
4. М.Б.Багдасарян, Л.И.Дорман. К теории нестационарной долговременной модуляции космических лучей. Препринт ЕФИ-591(78)-82.
5. М.Б.Багдасарян, Л.И.Дорман. Нестационарная модуляция галактических космических лучей солнечным ветром сферически расширяющейся ударной волной конечной толщины. ЕФИ-134(75). Научное сообщение 1975.
6. С.К.Акопян, Г.А.Асатрян, Х.П.Бабаян, М.Б.Багдасарян и Л.И.Дорман. Автомодельные решения теории нестационарной модуляции и вопросы экспериментальных исследований вариаций космических лучей на горе Арагац. "Изв.АН СССР", сер. физ., т. 42, № 5, 1978, 1098-1101.
7. М.Б.Багдасарян, Л.И.Дорман. Модуляция космических лучей ударной волной с учетом адиабатического охлаждения и поперечной диффузии. "Геомагнетизм и аэрономия", т. 20, № 6, 1980, с. 990-996
8. M.B. Bagdasaryan, L.I. Dorman Superposition of the Increase Effects and Forbush-Decreases in Galactic Cosmic Rays in the Presence of Successive Interplanetary Shock Waves; cooling and heating of particles between shock waves. Proc. 16-th International Cosmic Ray Conf., Kyoto, 1979, 12, p. 165-169.

9. M.B.Bagdasaryan, L.I.Dorman Diffusion Model of the Increase Effect Prior to Magnetic Storms and of Fokker-Plank Equation with Source. Proc. 16-th International Cosmic Ray Conference, Kyoto, 1979, 3, p.455.

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 320

ВФ- 04575

Тираж 170

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 13.09.83г.

Издано Отделом научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван 36, Маркарянна 2