

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ДИАГНОСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Г. П. Любимов

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
gpl1924@mail.ru*

МОЙ ПУТЬ В ФИЗИКУ

С детства у меня возник интерес к естествознанию и, особенно, к физике и астрономии. Способствовал этому мой старший брат. Он любил покупать разные книги и, особенно, справочники по разным предметам. Меня очень заинтересовали две книги по физике. В них было просто и ясно описаны различные явления в природе и было много иллюстраций. Одна книга русская: А. Цингер. Начальная физика 1-й ступени, а другая: перевод на русский язык – КУРСЪ ФИЗИКИ французского автора – ФЕРНЕ. В этой книге все иллюстрации были в стиле гравюр. Их было очень много, и они были очень детально выполнены. Эти две книги я постоянно читал, изучал картинки и **старался повторять опыты**, в них описанные. Для опытов надо было искать необходимые материалы и приборы. В этом мне помогал брат и мой крестный отец – врач. Он приносил мне устаревшие части физиотерапевтических приборов (вольтметры, амперметры, провода, трансформаторы, разрядники, магниты и много другого). Мой брат, который работал в мастерской фабрики «Большевик» (ранее: «Сиу и Ко»), приносил кусочки меди, латуни, бронзы, жести и проволоки. Позже, когда он учился в «Академии Бронетанковых войск», приносил Магнето и Бабины. По воскресеньям, мы ходили в магазин «Наглядные Пособия» (он стал потом магазином «Детский Мир»), и там он покупал мне гальванические элементы и ценные приборы (микроскоп, окуляры к нему и стекла с готовыми препаратами). Самым грандиозным подарком была большая «Катушка Румкорфа» на 150 тысяч вольт! На её основе я позже собрал аппарат Тесла. Из двух грампластинок я собрал электрофорную машину, потом и генератор Ван Графа. Была ещё старинная книга Камилла Фламариона! «Астрономия». И был собран телескоп с объективом из очкового стекла с фокусным расстоянием 1 метр и с окулярами от микроскопа (15 – 20 миллиметров). Труба была сделана из плотной чертёжной бумаги (и покрашена чёрной тушью). Этот телескоп был укреплен на фотографическом штативе. Всей семьёй рассматривали Луну, Юпитер со спутниками, Сатурн и туманности.

В старших классах школы я ассистировал учителю физики и строил новые приспособления и демонстрационные приборы для лучшего, наглядного понимания некоторых физических процессов.

После начала войны и трудового фронта, работа на заводах и в мастерских НИИФ МГУ, позволила мне научиться работать на металло-режущих станках и ознакомиться с техникой специального приборостроения.

Учиться научному поиску начал в 1947 г. на Кафедре колебаний физического факультета у профессора П. Е. Краснушкина. Он сочетал талант изобретательного экспериментатора, с даром теоретика умеющего найти оптимальный математический метод решения задачи. Его присутствие в лаборатории и вне её, отличалось быстротой ума, простотой общения и юмором. Далее, там же под руководством его ученика Р. В. Хохлова, я продолжил школу П. Е. Краснушкина и применил навыки в практической работе, полученные ранее. При моём активном участии была создана установка из двух молекулярных генераторов и выполнено 4 научных работы (1957-61 гг.).

Знакомится с физикой Солнца, с наблюдательными данными о солнечной активности начал с 1950 г. в КрАО у профессоров Э. Р. Мустель, и С. Б. Пикельнера.

В 1960 г. учителем стал директор НИИЯФ профессор С. Н. Вернов и начался новый научный поиск в космических исследованиях.

Г. П. Любимов, Р. В. Хохлов **О поляризации молекулярного пучка переменным полем с изменяющимися амплитудой и фазой** // ЖЭТФ, 1957, т. 33, вып. 6 (12), 1396.

КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С началом космической эры С. Н. Вернов создал в институте специальную лабораторию, в которой строили простейшие бортовые приборы и обрабатывали уникальную информацию о заряженных частицах космических лучей. После открытия радиационных поясов Земли главным направлением научной стратегии С. Н. Вернова стало исследование космических лучей вне магнитосферы Земли, в межпланетном пространстве. Этот приоритет был основан на глубоком понимании определяющей роли солнечной активности и процессов в гелиосфере, для распространения и модуляции солнечных и галактических космических лучей и явлений в магнитосфере Земли.

В 1980 году была основана Лаборатория физики гелиосферы (ЛФГ). За годы работы ЛФГ разработаны и созданы бортовые приборы для космических аппаратов. Проведены эксперименты на космических станциях "Зонд", "Марс", "Венера", "Луна", "Луноход", "Вега", "Фобос", "Гранат" (1961-96 гг., 44 станции) и впервые в нашей стране получен самый протяженный ряд однородных данных об интенсивности в космосе протонов с энергией больше 1 МэВ.

Планируемые полеты АМС к Венере, к Марсу, к Луне давали возможность использовать многомесячное движение станций по траектории полета к конечной цели для измерений характеристик космических лучей. С. Н. Вернов считал, что для надежного эксперимента основным детектором должен быть простой газоразрядный счетчик. Под защитой оболочки станции он регистрировал протоны с энергией больше 30 МэВ, и электроны больше 2 МэВ. При отсутствии солнечных вспышек прибор был чувствительным детектором ГКЛ (в 2-7 раз эффективнее полярных наземных станций), а при вспышках на Солнце регистрировал возрастания СКЛ. Другим простым и надежным детектором был полупроводниковый диод, который позволял при его установке вне гермоотсека станции, регистрировать протоны с энергией 1-5 МэВ. Такое сочетание детекторов обеспечивало весьма широкий энергетический диапазон СКЛ (1-100 МэВ) и высокую эффективность (чувствительность) по сравнению с наземными и даже со стратосферными измерениями. А одновременная регистрация вариаций СКЛ и ГКЛ позволяла иметь косвенные, но ценные сведения о вариациях межпланетного магнитного поля и несущего его солнечного ветра. Впоследствии эта методика привела к созданию направления: диагностики межпланетной среды (гелиосферы), а через нее и диагностики некоторых процессов солнечной активности.

Диагностическая методика основана на изучении характеристик и параметров движения заряженных частиц солнечных и галактических космических лучей в магнитных полях. Причинно-следственные связи источников возмущений с их откликами в гелиосфере позволяют судить о топологии магнитных полей в короне Солнца и в гелиосфере. Прямые зондовые методы не обладают такой возможностью. Диагностический метод позволяет обнаруживать новые формы структуры ММП и СВ. Особенно плодотворным является сочетание с прямыми наблюдательными данными. Такими данными в части СА являются данные с космических аппаратов SKYLAB, SOHO, TRACE STEREO. Эти данные в ультрафиолете и рентгене позволяют визуализировать корональные магнитные поля и их движения.

Но вот в 1965 году начала поступать регулярная информация с нашего прибора, установленного на межпланетной станции «Зонд-3». Эта станция при своём движении удалялась от Солнца, перемещаясь от орбиты Земли к орбите Марса. Далее начали полёт станции «Венера-2» и «Венера-3». Главные результаты были получены со станции «Венера-4», на которой были установлены два детектора для измерения анизотропии СКЛ.

ЗАМЕДЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

На наших первых АМС не было приборов для регистрации разрывов в СВ и ММП. На Земле магнетометры регистрировали внезапные начала магнитных бурь SC, а станции нейтронных мониторов регистрировали начала форбуш-понижений ГКЛ от сильных солнечных вспышек. В ряде работ по данным ИСЗ было показано, что момент SC соответствует прохождению фронта ударной волны. Наша аппаратура регистрировала форбуш-понижения в несколько раз эффективнее, чем на Земле. Нам было интересно определять средние скорости движения ВВП с ударными волнами, особенно при их регистрации в нескольких точках. Было известно о зависимости амплитуды форбуш-понижений от расстояния от Солнца и от направления вспышки (по долготе). Кроме того, было известно о замедлении расширения оболочек, после взрывов звёзд. И мы стали регулярно собирать данные и вычислять скорости движения ВВП. Данные о квазистационарных форбуш-понижениях от КПП образовали другую группу с большим рассеянием. При двух точках регистрации вычислялись средние скорости движения до каждой из точек и средняя скорость между точками. В некоторых случаях были данные о мгновенных скоростях в точках измерения. По радиоизлучению второго типа можно было иметь представление о начальной скорости.

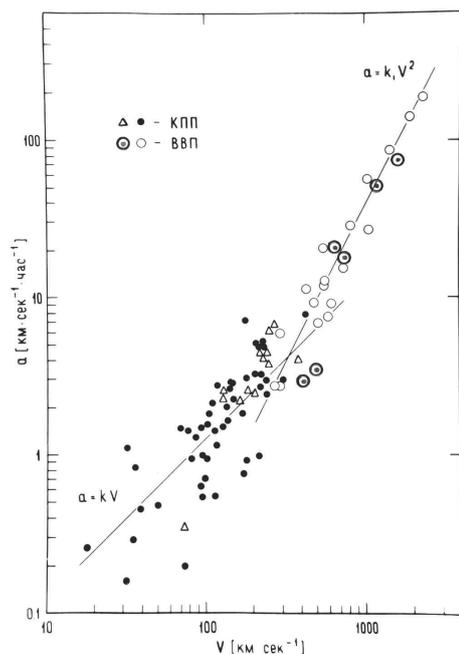
Впервые было обнаружено сильное торможение ударных волн от солнечных вспышек в СВ пропорциональное квадрату относительной скорости. Торможение квазистационарных потоков СВ было пропорционально первой степени относительной скорости. Дополнительно была найдена скорость спокойного СВ, равная 200 км/с, которая и вычиталась из средней скорости для получения относительной скорости. Полученные зависимости показывают, что движение квазистационарных и вспышечных потоков плазмы в СВ аналогично движению обтекаемого тела в вязкой жидкости или газе. Струи или выбросы замагниченной бесстолкновительной плазмы при движении не перемешиваются, но деформируются за счёт упругости и нагреваются за счёт вязкости. Явление легло в основу исследований в области космической газодинамики. Крупный теоретик из США М. Драйер (Murray Dryer) активно принял наш результат. Он создал специальную международную рабочую группу STIP (Study of Travelling Interplanetary Phenomena) для сбора и мониторинга всей информации (связанной с солнечными вспышками) с космических станций и комет в гелиосфере.

*Любимов Г. П. Замедление ударных волн от солнечных вспышек в космическом пространстве // **Астрономический Циркуляр АН СССР**, 1968, № 488, 4-7 (4).*

*Любимов Г. П., Переслегина Н. В. Торможение потоков солнечной плазмы // **Астрономический Циркуляр АН СССР**, 1974, № 836, 1-2 (2).*

Вернов С. Н., Тверской Б. А., Любимов Г. П., Переслегина Н. В., Контор Н. Н., Чучков Е. А.

Вариации интенсивности космических лучей и солнечный ветер // **Известия АН СССР, серия физическая, 1975, т. 39, № 2, 340-349 (10).**

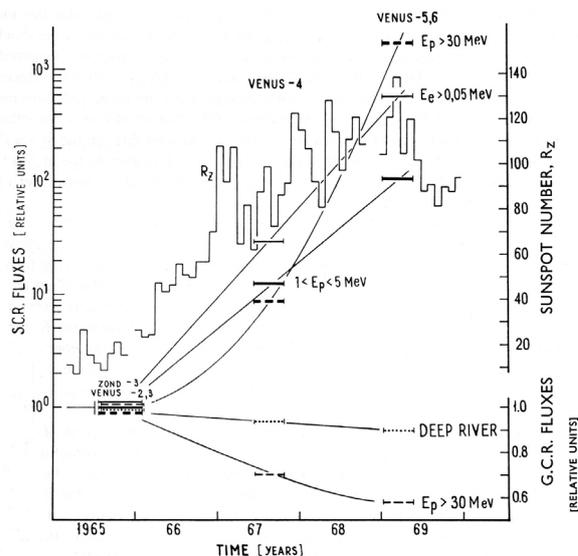


Торможение вспышечных выбросов плазмы (ВВП) с ударными волнами от солнечных вспышек и квазистационарных потоков плазмы (КПП) солнечного ветра, в зависимости от относительной скорости (за вычетом скорости 200 км/с).

11-и летний ход солнечных космических лучей

Впервые начал изучаться 11-и летний ход потока солнечных космических лучей в зависимости от солнечной активности. Увеличение частоты и продолжительности возрастных СКЛ в космических экспериментах позволило начать строить и изучать долговременный ход СКЛ. Для этого были использованы данные о протонах с энергией 1-5 МэВ, электронов с энергией более 0,1 МэВ и протонов с энергией больше 30 МэВ. Но наиболее достоверный и протяженный ряд данных относится к протонам СКЛ с энергией 1-5 МэВ. Были использованы потоки частиц, усреднённые за время функционирования (несколько месяцев) космических аппаратов: "Зонд 3", "Венера 2-8", "Марс 2-7", "Луна 19,22", "Луноход 1,2". Изучение связей между уровнем СА (число пятен R_z) и потоком протонов в 20-ом цикле СА показало, что существует прямая связь между логарифмом потока протонов СКЛ и числом пятен: $\lg N = 0.02 \cdot R_z$. Самые большие отклонения от этого соотношения наблюдались при 50% уровнях СА, на фазах роста и спада активности и достигали ± 0.5 порядка величины. Среднеквадратичное отклонение от этой величины составило $\pm 30\%$ (для логарифма потока). Используя менее регулярные и более кратковременные данные о вспышках для протонов с энергией более 30 МэВ, была получена оценка показателя интегрального энергетического спектра протонов СКЛ. Для усредненного значения по 20-ому циклу СА для показателя интегрального спектра протонов СКЛ с энергией более 1 МэВ можно принять значение 2 ± 0.6 .

Vernov S. N., Lyubimov G. P. **Low-Energy Cosmic Rays in Interplanetary Space** // STR/70, part II, D.Reidel Publ. Co. Holland, 1972, 92-109 (18).



Долговременный ход потока солнечных космических лучей в зависимости от солнечной активности. Логарифм потока протонов с энергией 1-5 МэВ пропорционален числу солнечных пятен.

ФОРБУШ-ЭФФЕКТ В СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

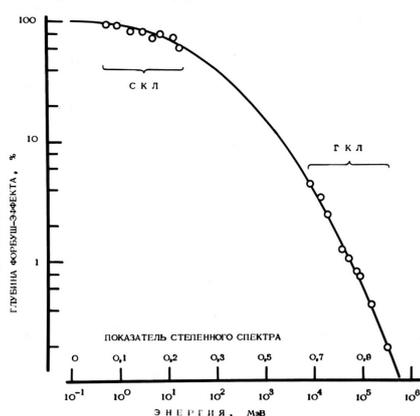
Впервые обнаружен форбуш-эффект в интенсивности солнечных космических лучей с энергией больше 1 МэВ и найдена единая форма модуляционного энергетического спектра для солнечных и галактических космических лучей: $A = A_0 \cdot 10^{-k \cdot (\lg E_n)^m}$, где A - глубина ФП в %, $k = 0.025$, $m = 2.5$, $E_n = E/E_0$ - энергия протонов E в МэВ, нормированная к энергии $E_0 = 0.1$ МэВ, при которой глубина ФП A_0 принята за 100%. Эта аппроксимация справедлива для конкретного случая и при комплексном совместном измерении потока СКЛ и ГКЛ.

Любимов Г. П., Контор Н. Н. Форбуш-понижения солнечных космических лучей //

Астрономический Циркуляр АН СССР, 1973, № 781, 5-7 (3).

Вернов С. Н., Контор Н. Н., Любимов Г. П., Переслегина Н. В., Тверской Б. А., Чучков Е. А.

Форбуш-эффект в интенсивности солнечных протонов // Известия АН СССР, серия физическая, 1978, т. 42, № 5, 1026-1029 (4).



Форбуш-эффект в интенсивности солнечных космических лучей с энергией больше 1 МэВ в едином модуляционном энергетическом спектре с галактическими космическими лучами.

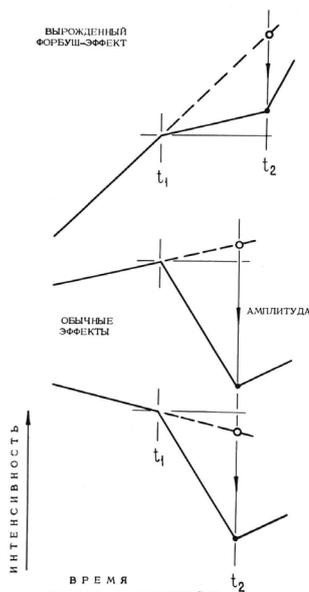
ВЫРОЖДЕННЫЙ ФОРБУШ-ЭФФЕКТ

Впервые обнаружен вырожденный форбуш-эффект в интенсивности галактических космических лучей. Вырожденный форбуш-эффект не имеет фазы спада, наблюдается на фазе восстановления предшествующего форбуш-эффекта и соответствует слабой модуляционной способности солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

Его необходимо учитывать при построении долговременного хода ГКЛ, при изменениях хода солнечной активности (рост или спад), на больших интервалах. Иначе, может быть «накоплена» большая ошибка (смотри рисунок).

Kontor N. N., Lyubimov G. P., Pereslegina N. V. **Small Forbush-decreases in galactic cosmic rays** // 15th Intern. Cosmic Ray Conf. Conf. papers MG Session, Plovdiv Bulgaria, 1977, v. 3, 290-293 (4).

Контор Н. Н., Любимов Г. П., Переслегина Н. В., Тулупов В. И., Чучков Е. А. **Характеристики межпланетной среды и солнечной активности во время обычного и вырожденного форбуш-эффектов космических лучей** // Космические исследования, 1985, т. 23, № 5, 736-742 (7).



Вырожденный Форбуш-эффект в интенсивности галактических космических лучей – не имеет фазы спада. Наблюдается на фазе восстановления предшествующего Форбуш-эффекта, соответствует слабой модуляционной способности межпланетного магнитного поля и солнечного ветра.

ВОСХОДЯЩИЙ ПОТОК

Была предложена физическая и расчётная модель восходящего ускоряющегося потока солнечного ветра между дискретными арочными структурами хромосферы и короны Солнца. Сделано моделирование процесса их выноса. Эта модель разрешает образование солнечного ветра с уровня фотосферы. Восходящий поток плазмы, за счёт вязкого взаимодействия, вытягивает арочные структуры и может их выносить от Солнца, образуя петли в межпланетной среде. Выше была показана необходимость существования регулярного восходящего потока плазмы с уровня нижней хромосферы или из фотосферы, который обтекает магнитные трубки с плазменными шнурами в них. Аналогичная дискретная структура арок наблюдается в короне Солнца на лимбе во время затмений и на рентгеновских фото на диске. Особенно отчетливо системы арок в АО и между ними можно видеть 15.VII и 5.IX.73 г., изучая эти фото стереоскопическим методом. Постепенно ускоряющийся поток плазмы с нижних уровней солнечной короны обнаружен методом ее радио-просвечивания. Наблюдался подъем арок короны на высоте 0.2 радиуса со скоростями 10-25 км/с. Учитывая высокую плотность энергии магнитного поля на высотах хромосферы и короны и низкую плотность кинетической энергии потока плазмы, необходимо предложить дискретную модель струйного, ленточного течения восходящего потока плазмы между дискретной структурой солнечных арочных магнитных полей. В солнечной атмосфере и в межпланетной среде существует взаимосвязанная двойная система дискретных взаимопроникающих структур СМП, ММП и восходящих струйных потоков плазмы переходящих в СВ. Магнитные поля и плазма также состоят из двух компонент:

восходящий поток с фоновым СМП, обтекающий сильные арочные СМП с плазмой в них, переходящий в СВ с фоновым ММП, увлекающий петли ММП с плазмой в них. В дискретной модели легко реализовать ускорение СВ с малых высот. Восходящий поток плазмы образует систему струйных или ленточных течений между системой трубок и слоев (аркад) магнитного поля. Дискретность магнитных трубок обусловлена дискретностью их полюсов на фотосфере и дополнительной изоляцией самим восходящим потоком плазмы. Течение между одноименными полюсами отдельных магнитных трубок или систем аркад снимает трудность движения плазмы поперек магнитного поля. Следует заметить, что напряженность поля между одноименными полюсами имеет максимум на некоторой высоте, и расхождение поля над ним образует как бы сопло Лавалья для восходящей плазменной струи. Это замечание можно применить и к трубчатым полюсам, модификации которых могут реализоваться в основаниях спикул. Расхождение магнитного потока в униполярных областях также образует воронкообразные области цилиндрического или щелевого типа. Они могут образовать источники плазменных струй.

Задачу об обтекании магнитной трубки плазменным потоком можно существенно упростить, используя гидродинамическую аналогию с обтеканием вязкой жидкостью эластичного, находящегося за пределом упругости тела в форме арки.

Все приведенные данные указывают на необходимость существования глобального восходящего потока солнечной плазмы с нижних уровней солнечной атмосферы. Эта дискретная модель снимает основную трудность прежних сепарационных моделей, запрещающих течение поперек сильных магнитных полей. Струйная модель не только дает возможность устранить трудности, связанные с течением в слабом и сильном поле, но допускает существование тонкой структуры течения, а именно струй и высокой и низкой скоростей в областях относительно пассивных или активных. Модель можно распространить и на более низкие петли сильного магнитного поля в АО, но при больших скоростях потока плазмы. На расстояниях более 30 солнечных радиусов разноскоростные струи в результате взаимодействия и в зависимости от скважности, будут определять скорость крупномасштабного потока. Существование корональных и гелиосферных петель различного масштаба согласуется с отражательной моделью распространения СКЛ, которая хорошо описывает сложные наблюдательные профили СКЛ и их характеристики. В соответствии с этой моделью гелиосферные квазистационарные системы петель ММП заполняются при вспышках частицами СКЛ наподобие радиационных поясов Земли.

*Любимов Г. П. Вытягивание магнитных петель в атмосфере Солнца // **Астрономический Циркуляр АН СССР**, 1986, № 1441, 5-6 (2).*



Модель восходящего ускоряющегося потока солнечного ветра между дискретными арочными структурами хромосферы и короны Солнца. Восходящий поток плазмы, за счёт вязкого взаимодействия, вытягивает арочные структуры и может выносить их образуя петли в межпланетной среде.

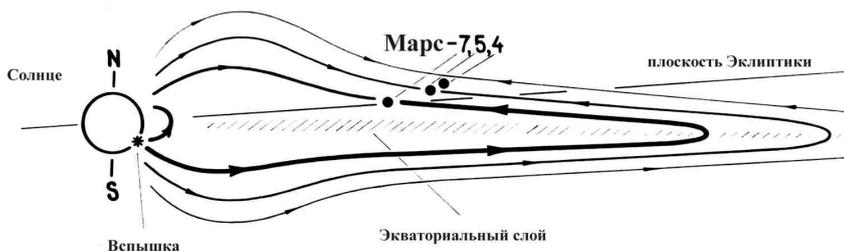
МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПЕТЛИ

Фундаментальный результат был получен при полёте АМС «Марс-4,5,7» в 1973 году. От вспышки в западной части диска Солнца, но в южном полушарии была зарегистрирована отрицательная анизотропия. Впервые по ходу анизотропии солнечных космических лучей на трёх автоматических станциях «Марс» были обнаружены дискретные петли межпланетного магнитного поля размером до 6 астрономических единиц. Эти петли были вытянуты солнечным ветром из активных областей Солнца, в одной из которых произошла вспышка, заселившая их солнечными космическими лучами. Характерные размеры дискретности трубок, образующих петли были равны: 10^6 км, или 1 градусу, или 1 часу.

Следует добавить, что позже в 1984 году нами были обнаружены непосредственно в СВ и в ММП дискретные дублетные и мультипетельные структуры. Их основу составляли магнитные трубки (минимум поля на оси). Далее анализ вспышки 19.03.90 на ИСЗ «Гранат» позволил обнаружить пучки таких трубок (названных нами «меандр») с характерным размером $(0.5 \div 2) \cdot 10^6$ км и с минимальным - $0.03 \cdot 10^6$ км на 1а.е. Здесь следует подчеркнуть, что эти структуры СВ и ММП являются квазистационарными образованиями. Они существуют всегда, непрерывно вытягиваются СВ и не связаны со вспышками. Вспышечные структуры имеют другую топологию.

Результаты 1973, 1984, 1990 и 1967 годов стали основанием для создания новой модели СВ и ММП - «восходящий поток», «отражательной» модели распространения и накопления СКЛ, и определения квазистационарных ЛРПС в гелиосфере.

Любимов Г. П., Контор Н. Н., Переслегина Н. В., Игнатьев П. П. Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // Известия АН СССР, серия физическая, 1976, т. 40, № 3, 462-470 (9).



Дискретные петли межпланетного магнитного поля, вытянутые солнечным ветром из активных областей Солнца, в одной из которых 7.09.73 произошла вспышка, заселившая их солнечными космическими лучами. Схема построена по ходу анизотропии потока солнечных протонов с энергией больше 1 МэВ.

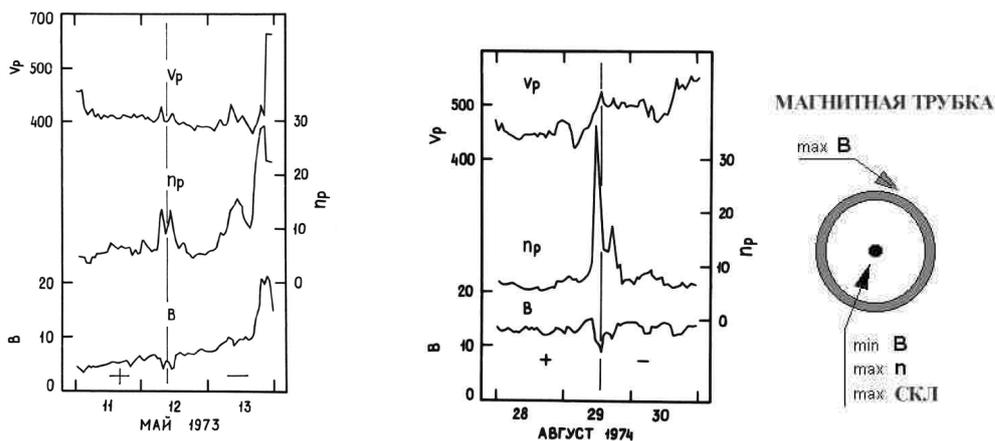
ДУБЛЕТНЫЕ СТРУКТУРЫ

Впервые найдены в спокойном солнечном ветре и межпланетном магнитном поле дублетные и мультиплетные структуры – большие квазистационарные импульсы потока. **Показано**, что это сечения межпланетных трубчатых петель с плазмой длиной более 1 ае. Кроме дублетов, как основной, фундаментальной формы, были найдены двойные дублеты и большие, протяжённые «мультиплеты». На Солнце, в солнечном магнитном поле, полюса всегда разделены волокном протуберанца. Элементарные трубчатые петли ограничены тонким «скин-слоем» максимального магнитного поля, а в центре трубки расположен максимум концентрации плазмы. Поток СКЛ распространяется вдоль трубки.

Любимов Г. П., Переслегина Н. В. **Отображение структуры солнечной атмосферы в солнечном ветре** // *Астрономический Циркуляр АН СССР*, 1984, № 1323, 2-4 (3).

Любимов Г. П., Переслегина Н. В. **Отображение структуры хромосферы и короны Солнца в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле** // *Астрономический журнал*, 1985, т. 62, вып. 4, 780-789 (10).

Любимов Г. П. **Стереоскопический метод анализа рентгеновских фотографий Солнца** // *Астрономический Циркуляр АН СССР*, 1985, № 1362, 4-5 (2).



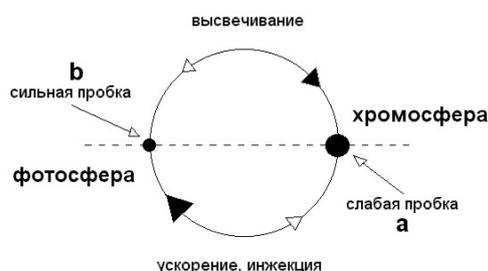
Дублетные структуры - петли в спокойном солнечном ветре, на расстоянии 1 АЕ, и схема сечения одной из трубок дублета (петли).

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЛЯХ

Впервые показано существование циркуляции заряженных частиц во вспышечных петлях и **необходимость существования** подфотосферного, кумулятивного механизма ускорения. Это заключение получено на основе изучения вариаций хода **световой кривой** малой рентгеновской вспышки, в которой были обнаружены секундные **антифазные**

осцилляции свечения и выполнен дополнительный анализ этих данных. По этим данным была построена модель события и рассчитаны параметры движения электронов в петлевом ускорителе-инжекторе. Эта новая модель солнечной вспышки основана на подфотосферной конвекции и «восходящем потоке» с уровня фотосферы в корону.

Любимов Г. П. Особенности солнечной вспышки // Космические исследования, 2000, т. 38, № 6, 619-623 (5).



Модельная схема циркуляции заряженных частиц во вспышечных петлях с необходимостью существования подфотосферного, механизма ускорения.

ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Сформулирована физическая и эмпирическая модель движения, переноса и накопления солнечных космических лучей в петлевых ловушках межпланетного магнитного поля, на основании целого ряда экспериментальных данных. Для описания возрастных СКЛ высоких энергий, наблюдаемых уже 50 лет на наземных станциях космических лучей, широко используется диффузионное приближение. Форма возрастания СКЛ оказалась весьма похожей на профиль диффузионной волны, хотя были и исключения. Диффузионное описание оперирует лишь со временем запаздывания максимума СКЛ от момента вспышки на Солнце, расстоянием от Солнца до детектора и кинетической скоростью частиц СКЛ. Эти исходные параметры позволяют определить коэффициент диффузии и пробег частиц до рассеяния, т.е. характерное расстояние между рассеивающими центрами (магнитными неоднородностями). Возникают трудности при описании более сложных профилей СКЛ, случаев с высокой анизотропией и особенно при снижении энергии частиц. Диффузионное приближение хорошо описывает лишь максимум и фазу спада, использует лишь усредненное описание межпланетной среды, не учитывает условия в источнике, в короне, не может описать высокую коллимацию СКЛ, т.е. большую положительную анизотропию потока и тем более высокую отрицательную анизотропию. Для более адекватного описания экспериментальных данных используется трансформация диффузионного приближения: анизотропная диффузия, коллимированная диффузия, вводятся зависимости параметров диффузии от координат и времени.

В 1988 г. на основе ряда экспериментальных данных оформилось другое представление о распространении СКЛ в короне и ММП. Данная модель получила название «отражательная», т.к. была основана на наблюдении в 1967г. «отраженного» профиля СКЛ и на представлениях о частичном захвате и колебаниях при отражении от магнитных пробок, пакета СКЛ, ускоренных во вспышке. Представление о петлевых магнитных ловушках в короне и в межпланетной среде основано на наблюдении: арочных структур на рентгеновских фотографиях солнечной короны, на отождествлении межпланетных магнитных петель в СВ и на диагностики межпланетных петель по СКЛ. Рассмотрим последовательно феноменологическое и математическое описание модели.

Корональные магнитные поля суть арки и петли различной конфигурации и размеров. Они соединяют фотосферные магнитные поля разного знака: флоккулы АО, соседние по

гелиодолготе или по гелиошироте АО и ячейки фонового магнитного поля. Такая картина наблюдается на диске Солнца в рентгеновском и ультрафиолетовом излучении и на лимбе Солнца при наблюдении оптической короны во время солнечных затмений. Корональные магнитные поля выносятся восходящим ускоряющимся потоком солнечной плазмы, СВ, в межпланетную среду, заполняя гелиосферу. Система петлевых ММП вращается вместе с Солнцем и принимает форму спиралей Архимеда. Эта картина основана на данных, полученных с помощью просвечивания корональной плазмы радиоволнами (до 50-ти радиусов Солнца), на обнаружении в СВ и ММП устойчивых петлевых структур и на их диагностики по СКЛ.

Такие квазистационарные (существуют в течение нескольких солнечных оборотов) системы корональных и межпланетных магнитных полей представляют ловушки для частиц СКЛ. Эти ловушки имеют широкий спектр размеров, ориентированы в различных плоскостях, собраны в пучки в соответствии с расположением их оснований на Солнце и перераспределены в межпланетной среде за счет динамических процессов в СВ. Они обладают различной прозрачностью и поглощением для СКЛ. Эти свойства сосредоточены в магнитных пробках у оснований и в вершине петли, а так же распределены вдоль петли. Наиболее эффективными являются большие межпланетные ловушки.

Частицы СКЛ, ускоренные во время вспышки в одной из корональных или хромосферных арок за счет дрейфовых движений в весьма неоднородных магнитных полях, быстро распространяются по связанным арочным системам короны на значительные угловые расстояния в атмосфере Солнца, обеспечивая так называемое корональное распространение СКЛ, в том числе и от залимбовых вспышек. Частичный захват СКЛ в корональных арках создает систему вторичных сопряженных источников. Другая часть СКЛ распространяется из этих вторичных источников и захватывается более эффективно в присоединенных петлях ММП, выносимых из короны ускоряющимся потоком СВ. Неоднородная заселенность этой системы полупрозрачных ловушек обеспечивает гелиодолготное и гелиоширотное распределение СКЛ в гелиосфере. Выход частиц из системы петлевых ловушек в связи с их конечной прозрачностью и поглощением существенно затягивается во времени по сравнению с коротким временем генерации, увеличивая время жизни СКЛ в системе ловушек. Эта модель хорошо объясняет совокупность наблюдательных феноменов в характеристиках СКЛ (особенно в области малых энергий частиц): вторичные максимумы интенсивности, высокую знакопеременную анизотропию потока, “отраженные профили”, быстрое распространение от восточных и залимбовых вспышек, гелиодолготная зависимость, длительное удержание частиц и т.д.

Все сказанное выше можно записать совокупностью простых соотношений. Сразу отметим важное свойство: спектр в ловушке мягкий и с течением времени еще больше смягчается, а спектр инжекции - жесткий, с течением времени также смягчается, но он из степенного трансформируется в спектр с загибом в области малых энергий. Колебания частиц в межпланетной петле и утечка из нее также приводят к аналогичной трансформации формы спектра СКЛ и к существенному возрастанию времени жизни частиц. Оно определяется размерами ловушки, кинетической скоростью частиц, пичч-угловым распределением, коэффициентом отражения и его зависимостью от энергии частиц. Гелиодолготное распределение СКЛ хорошо аппроксимируется экспонентой. В некоторых случаях для описания очень протяженных систем петлевых ловушек лучше использовать косинусоидальную зависимость. Гелиодолготная зависимость преобразует одномерную модель в плоскую аксиально-симметричную.

Динамические вспышечные процессы: транзиенты, предвспышечные и вспышечные возмущения с ударными волнами наименее изучены и более трудны для модельного описания. В этих случаях мы имеем дело с особыми феноменами в СКЛ: частицы, наблюдаемые совместно с ФП, т.е. совместно с совокупностью: ударная волна, сжатый СВ, контакт со вспышечным газом, сложная структура плазмы и магнитного поля вспышечного поршня, обратная ударная волна. В этих феноменах СКЛ имеют следующие основные

характеристики: малая двунаправленная анизотропия, мягкий спектр, очень малая дисперсия по скоростям, весьма большие потоки, их структурность, отрицательная анизотропия на заднем фронте события. Все эти качества наряду с принципиальной возможностью дополнительного ускорения частиц в этих структурах, не исключают возможности наблюдения СКЛ, переносимых в ловушках, движущихся квазирадиально от Солнца. Можно предположить три вида таких ловушек: трубка-петля, связанная с Солнцем, автономная локальная конфигурация с замкнутым полем и модуляционная ловушка, бегущая по квазистационарным петлям ММП в СВ.

Отражательная модель формировалась и опробовалась на ряде вспышечных возрастных СКЛ, наблюдавшихся на космических аппаратах “Венера 4”(08.67), “Венера 7” (11.70), “Луна 22” (06.74), “Прогноз 8”(04.81. и 05.81), “Пионер 10,11”(05.81. и 08.82.), “Вега 1,2” и “Прогноз 10”(07.85), “Гранат” (03.90, 03.91, 06.91). Эти данные были получены на расстояниях 0.75-15 а.е. от Солнца, при угловой дистанции 0-360 градусов, при энергиях протонов в диапазоне 1-500 МэВ и электронов - более 6 МэВ. Сделанные аппроксимации дают довольно детальное описание экспериментальных данных и позволяют получить ряд физических параметров: число частиц и спектр в источнике, коэффициенты прозрачности ловушек и зависимость их от энергии частиц, гелиодолготное распределение и, следовательно, параметры дрейфовых движений СКЛ в короне, структуру соединений АО на Солнце, протяженность петель ММП, сведения о диаграмме направленности вспышечного выброса и ударной волны.

Несмотря на простоту и практическую применимость модели необходима ее дальнейшая разработка. Необходимо выяснить роль неучтенных физических процессов, более строго обосновать принятые упрощения: “зеркальность” отражений, т.е. изменение питч-угла на пробке на ± 180 градусов и отсутствие “конуса потерь”, отсутствие изменения напряженности магнитного поля вдоль ловушки, питч-углового распределения частиц и их рассеяния, отсутствие зависимости ряда параметров от времени. Необходимо находить внутренние связи между различными многочисленными параметрами с целью выявления новых физических закономерностей и для уменьшения их числа (параметров) при использовании модели в целях краткосрочного и оперативного прогноза СКЛ и возмущений межпланетной среды.

Любимов Г. П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках //

Астрономический Циркуляр АН СССР, 1988, № 1531, 19-20 (2).

Любимов Г. П., Чучков Е. А. Система петлевых межпланетных ловушек в СКЛ в июне

1974 г. // Космические исследования, 1991, вып. 6, 911-916 (6).

Ермаков С. И., Любимов Г. П., Тулупов В. И. Модель события в космических лучах

23-31. 03. 91 г. // Космические исследования, 1995, т. 33, № 2, 128-138 (11).

ЛОКАЛЬНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА СОЛНЦА

Впервые показано существование нового образования, названного нами – локальные радиационные пояса Солнца (ЛРПС) на основе изучения большого количества экспериментальных данных по солнечным космическим лучам и наблюдательных данных солнечной короны. ЛРПС – суть большие межпланетные квазистационарные ловушки СКЛ. Они обеспечивают длительное удержание (время жизни) энергичных частиц солнечных вспышек. В их основе, как правило, расположены дублетные или более сложные петельные структуры.

Любимов Г. П. Локальные радиационные пояса Солнца // Космические исследования, 2002, т. 40, № 6, 610-615 (6).

Перечисленные выше результаты и их предпосылки отражены в целевом обзоре:

Любимов Г. П. Диагностическая методика исследования межпланетного магнитного поля,

плазмы солнечного ветра и их источников на Солнце // Известия АН, серия физическая, 2003, т. 67, № 3, с. 353-366.

