

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Исследования космических лучей на баллонах
в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Ю.И. Стожков, В.С. Махмутов, Н.С. Свиржевский

С 1957 г. по настоящее время Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН проводит регулярные измерения потоков космических лучей в атмосфере. Дано краткое описание эксперимента. В атмосфере регистрируются вторичные потоки заряженных частиц, которые в основном (более 99 %) образуются первичными протонами и ядрами. Проведён анализ долговременных (11- и 22-летних) изменений потоков космических лучей в атмосфере, образованных первичными протонами и ядрами, и потоков первичных электронов. Данные по первичным электронам получены на высотных баллонах и спутниках. Результаты анализа показывают, что в гелиосфере временные зависимости частиц с положительным и отрицательным электрическими зарядами имеют одинаковый вид, т.е. модулируются одинаковым образом. Этот результат противоречит общепринятой модели модуляции космических лучей в гелиосфере, в которую необходимо внести существенные изменения.

Ключевые слова: космические лучи, солнечная активность, гелиосфера, модуляция

PACS numbers: 96.50.S-, 96.50.Xy, 96.60.lv

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.06.039215>

Содержание

1. Введение (1054).
 2. Аппаратура (1056).
 3. 11- и 22-летний циклы в космических лучах (1057).
 4. Магнитные поля в гелиосфере и процессы, определяющие модуляцию космических лучей (1059).
 5. Что показывают экспериментальные данные? (1060).
 6. Заключение (1062).
- Список литературы (1062).

1. Введение

Долгопрудненская научная станция (ДНС) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) была образована по закрытому Постановлению Совета Народных Комиссаров от 4 марта 1946 г. № 503-208. Текст Постановления был очень кратким: "Организовать Научную станцию Физического института Академии наук СССР в г. Долгопрудном, Московской области". Под Постановлением стояла подпись Председателя Совета Народных Комиссаров И.В. Сталина. Инициатором создания станции был академик С.Н. Вернов, его поддержали академики С.И. Вавилов и Д.В. Скобелев.

Ю.И. Стожков^(а), В.С. Махмутов^(б), Н.С. Свиржевский^(с)
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(а) stozhkovyi@lebedev.ru, ^(б) makhmutovvs@lebedev.ru,
^(с) svirzhevskyns@lebedev.ru

Статья поступила 18 апреля 2021 г.

В то время перед государством стояла главная задача — создание атомного оружия. Поэтому первое десятилетие сотрудники ДНС занимались изучением свойств космических лучей (КЛ) и их взаимодействием с ядрами различных элементов. В те годы КЛ были практически единственным источником частиц высокой энергии, с помощью которых можно было изучать ядерные взаимодействия. В атмосферу запускались достаточно тяжёлые для того времени научные приборы на гирляндах из метеорологических оболочек (рис. 1). Результаты измерений передавались по радио на наземные приёмные пункты. Запуски научной аппаратуры осуществлялись с территории ДНС ФИАН, на юге в районе г. Ош, и в Индийском океане с борта морского судна. Были полу-

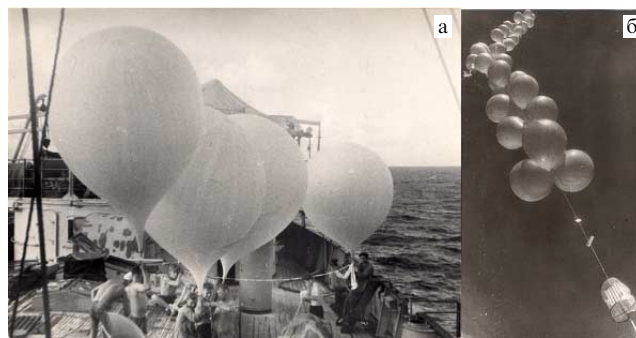


Рис. 1. (а) Борт теплохода "Витязь", Индийский океан, 1949 г. Подготовка к запуску прибора для изучения потоков КЛ в атмосфере. (б) Запуск научной аппаратуры. Для подъёма аппаратуры на высоту 30–35 км использовались гирлянды из аэрологических оболочек.

чены новые сведения о природе космических лучей, о сечениях их взаимодействий с ядрами воздуха и др. [1–8]. В 1949 г. руководитель этих работ С.Н. Вернов был удостоен Сталинской (Государственной) премии I степени за экспериментальные исследования КЛ в верхних слоях атмосферы.

Изучение модуляционных эффектов в КЛ методом регулярного зондирования было начато С.Н. Верновым вместе с А.Н. Чарахчяном в середине 1957 г. Этот год был объявлен Международным геофизическим годом. Была образована мировая сеть станций КЛ (в основном нейтронных мониторов) для исследования модуляционных эффектов. В СССР сеть станций КЛ, включающих нейтронные мониторы и станции по зондовым измерениям КЛ непосредственно в атмосфере, была создана С.Н. Верновым. С тех пор непрерывные измерения потоков КЛ на поверхности Земли и регулярные измерения заряженных частиц в земной атмосфере проводятся по настоящее время, т.е. в течение более 65 лет.

Можно поставить вопрос: зачем нужно измерять КЛ в атмосфере на разных широтах (от полярных широт до экваториальных) и на разных высотах (от уровня Земли до 30–35 км)? Суть измерений на разных широтах состоит в том, что магнитное поле Земли используется в этом случае как анализатор частиц по их энергии или жёсткости R_c ($R_c = pc/(ze)$, где R_c — геомагнитная жёсткость обрезания в гигаэВтах, p — импульс частицы, c — скорость света, ze — заряд частицы, e — заряд электрона). В каждую точку наблюдений на границу атмосферы геомагнитное поле допускает частицы с жёсткостью $R \geq R_c$. При движении от полюса к экватору величина R_c изменяется от 0 до 15–17 ГВ. Измерения, выполненные на разных широтах, позволяют изучать модуляционные эффекты КЛ в разных интервалах их энергий. С другой стороны, атмосфера Земли сама является естественным анализатором частиц по их энергиям. Чем ниже в атмосфере проводятся измерения (чем больше атмосферное давление), тем больше средняя эффективная энергия регистрируемых частиц. Например, в полярных районах, где $R_c \approx 0$, на высотах ~ 30 км регистрируются протоны с энергией начиная со 100 МэВ. На поверхности Земли на той же широте первичный протон, чтобы быть зарегистрированным по своим вторичным нейтронам или вторичным заряженным частицам, должен иметь энергию более 1,5 ГэВ или более 9,0 ГэВ соответственно.

Следующий вопрос: зачем нужны длительные (несколько десятков или сотен лет) наблюдения потоков КЛ? Ответ на этот вопрос достаточно простой: КЛ подвержены значительному влиянию солнечной активности, которая изменяется с периодами ≈ 11 , ≈ 22 , ≈ 90 лет и с более длительными периодами. Иногда на Солнце наблюдаются глубокие минимумы солнечной активности, примерно один раз в 180 лет. С большой степенью вероятности сейчас мы находимся в одном из таких минимумов. Так как КЛ играют существенную роль в атмосферных процессах, в атмосферном электричестве и в глобальном изменении климата, необходимо иметь информацию о их потоках в атмосфере за длительные временные интервалы [9–13]. Наши учителя, С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков, А.Н. Чарахчян, понимали необходимость проведения длительных измерений КЛ и поддерживали эти исследования. Даже в "бандитские" 90-е годы прошлого столетия регулярный мониторинг КЛ в атмо-

сфере не прекращался. В тот период А.Е. Чудаков был председателем Научного совета по комплексной проблеме "Космические лучи", и только благодаря его поддержке удалось сохранить регулярное зондирование КЛ в атмосфере.

Длинные ряды данных по потокам КЛ и солнечной активности являются основой для понимания физических процессов, связывающих вариации космических лучей с солнечной активностью, с характеристиками солнечной плазмы в гелиосфере, дают возможность проверить правильность теоретических представлений о модуляции КЛ и обоснованность теоретических предсказаний. На длинные ряды однородных экспериментальных данных опирается физическое (математическое) моделирование 11- и 22-летних вариаций галактических космических лучей (ГКЛ), выявление и изучение природы других долговременных трендов в различных индексах солнечной активности.

Надо отметить, что длительные наблюдения различных физических параметров проводятся во многих областях науки. Например, регулярные наблюдения за солнечной активностью (за числом солнечных пятен) проводятся с 1740 г., глобальная температура приземного слоя атмосферы измеряется с 1880 г., солнечная постоянная (поток солнечной энергии на орбите Земли) — с 1978 г. Благодаря таким длительным наблюдениям мы имеем необходимую количественную информацию о изменениях уровня солнечной активности, глобальном потеплении климата на временных масштабах в несколько десятков-сотен лет, изменении солнечной постоянной от максимума к минимуму солнечной активности в 11-летнем солнечном цикле.

Регулярные измерения потоков заряженных частиц в атмосфере от уровня Земли до высот 30–35 км начались в северных полярных районах (Мурманская область, геомагнитный порог обрезания $R_c = 0,5$ ГВ) и в Подмосковье (г. Долгопрудный, Московская область, $R_c = 2,4$ ГВ) в середине 1957 г. Позднее такие измерения были организованы на средних широтах (г. Алма-Ата, совместно с Казахским университетом, $R_c = 6,7$ ГВ, 1962–1990 гг.), в Антарктиде (станция Мирный, $R_c = 0,04$ ГВ, с 1963 г. по настоящее время). Во второй половине XX в. длительные (более ~ 10 лет) измерения потоков КЛ в атмосфере проводились в Тикси (совместно с Институтом космофизических исследований и аэронавтики (ИКФИА) СО АН СССР), в Ереване (совместно с Ереванским физическим институтом АН Армянской ССР), в Норильске (совместно с Иркутской станцией Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) СО АН СССР). Кроме того, был выполнен большой объём работ по изучению планетарного распределения потоков заряженных частиц на различных высотах в атмосфере. Запуски радиозондов проводились с бортов научно-исследовательских судов, следовавших из Ленинграда в Антарктиду и обратно [14–18].

Заметим, что и в настоящее время исследования КЛ проводятся широким фронтом многими лабораториями мира и охватывают большой диапазон энергий частиц, от 10^6 до 10^{21} эВ. Потоки КЛ в области энергий 0,1–30 ГэВ зависят от уровня солнечной активности и значительно уменьшаются в годы максимума активности Солнца. Определённый вклад в поток КЛ, регистрируемый в гелиосфере, вносит Солнце. На Солнце иногда

происходят мощные вспышки с огромным энерговыделением $\sim 10^{32}$ эрг, в которых ускоряются заряженные частицы (в основном протоны) до энергий ~ 20 ГэВ.

Таким образом, исследования КЛ включают в себя изучение процессов рождения КЛ в источниках, их распространения в Галактике и Солнечной системе, процессов генерации заряженных частиц на Солнце и их распространения в околосолнечном и межпланетном пространстве.

За период с середины 1957 г. по настоящее время сотрудниками ДНС ФИАН проведено более 87 тыс. запусков радиозондов КЛ в разных точках Земного шара. Получен уникальный в мировой науке однородный экспериментальный материал о потоках заряженных частиц на широтах с разными геомагнитными жёсткостями обреза и на различных высотах в атмосфере.

Какие же вопросы исследуются методом регулярного зондирования потоков заряженных частиц в земной атмосфере?

1. Изучение долговременных вариаций КЛ в 11- и 22-летних циклах солнечной активности и связи этих вариаций с параметрами солнечной активности и межпланетной среды.

2. Изучение короткопериодических вариаций КЛ (27-дневных, суточных вариаций, форбуш-понижений в КЛ) и их связи с солнечной активностью.

3. Регистрация вспышек солнечных КЛ в атмосфере, изучение механизмов ускорения частиц в солнечных вспышках и процессов распространения этих частиц в гелиосфере.

4. Изучение высыпаний частиц (электронов) из радиационных поясов Земли в атмосферу на высоких (возможно, и на средних) широтах.

5. Исследование связей потоков заряженных частиц с характеристиками атмосферного электричества. КЛ являются основным источником создания электрических зарядов (ионов) в земной атмосфере.

6. Исследование роли потоков заряженных частиц в атмосферных процессах и в изменении климата Земли. Актуальность этого направления стала особенно ясной в последние два десятилетия. В ЦЕРНе в течение более 10 лет проводится специальный эксперимент CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) (с участием сотрудников ДНС ФИАН), направленный на выяснение роли КЛ в атмосферных процессах и в изменении климата.

7. Осуществление оперативного контроля радиационной обстановки в атмосфере, регистрация радиоактивных облаков.

Далее будет обсуждаться вопрос о долговременных вариациях КЛ, в частности вопрос о правильности наших представлений о модуляции КЛ в гелиосфере. Рассмотрение других тем, таких как происхождение КЛ, их распространение в Галактике, солнечные космические лучи и высыпания частиц в земную магнитосферу, можно найти в работах [19–22].

2. Аппаратура

Для проведения регулярных измерений потоков КЛ в атмосфере в ФИАНе были разработаны специальный радиозонд КЛ (рис. 2) и наземная приёмная аппаратура. В каждом полёте радиозонда измеряются потоки заряженных частиц на разных высотах в атмосфере. Детекторами заряженных частиц с начала измерений по настоя-

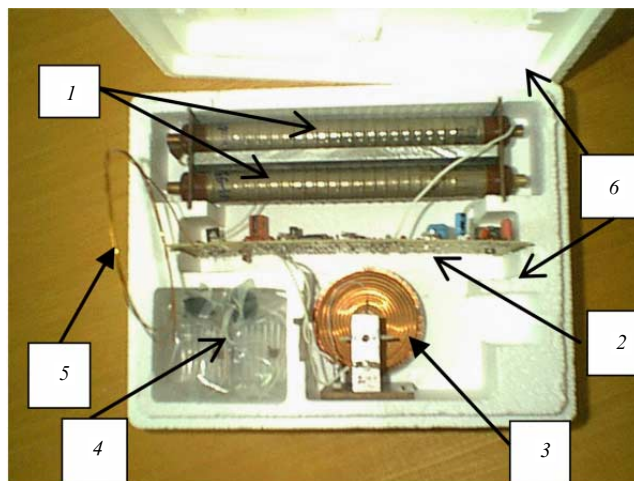


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Радиозонд КЛ, разработанный сотрудниками ДНС ФИАН: 1 — газоразрядные счётчики СТС-6, 2 — электронная схема с высоковольтным преобразователем на 400 В и ультракоротковолновым (УКВ) передатчиком, 3 — датчик атмосферного давления, 4 — батареи питания, 5 — антенна УКВ-передатчика, 6 — пенопластовый корпус.

щее время являются газоразрядные счётчики СТС-6, выпускаемые в нашей стране. Эти детекторы не требуют высоковольтного питания (рабочее напряжение на счётчике 380 В), имеют высокую стабильность и могут работать в течение нескольких десятков лет. До начала 2000-х годов радиозонд имел два счётчика СТС-6, которые составляли телескоп двойных совпадений. Между счётчиками помещался 7-миллиметровый алюминевый фильтр, поглощающий частицы от радиоактивности (естественной или искусственной). Каждая заряженная частица, попадая в верхний счётчик или проходя через телескоп, вызывает срабатывание электроники. Одиночный счётчик регистрирует КЛ и радиоактивность, а телескоп — только КЛ. Частицы, зарегистрированные одиночным счётчиком или телескопом, имеют разные длительности радиосигналов [23]. Электроника формирует импульс передатчика, который передаётся на наземный приёмный пункт. На Земле приёмная аппаратура разделяет эти сигналы. В настоящее время вес радиозонда составляет 600–700 г (до начала 1970-х годов радиозонд весил 2–3 кг). В последние два десятка лет силами сотрудников ДНС ФИАН ежегодно изготавливается около 500 радиозондов КЛ. С начала 2000-х годов из-за финансовых трудностей в радиозонде используется только один счётчик.

Приёмная аппаратура состоит из УКВ-приёмника типа Р-313, осциллографа и компьютера. С приёмника на компьютер приходят сигналы, имеющие разную длительность: 300–500 мкс от счётчика и 800–1000 мкс от телескопа. На компьютере специальная программа разделяет эти сигналы на два канала и усредняет счёт каждого канала за время Δt , обычно равное 1 мин. Когда срабатывает датчик атмосферного давления через определённые интервалы значений Δp , где p — атмосферное давление [г см^{-2}], длительность сигналов от телескопа увеличивается до ~ 1500 мкс. Таким образом, радиозонд передаёт информацию по трём каналам: 1-й канал — данные одиночного счётчика (радиоактивность и КЛ), 2-й канал — данные телескопа (КЛ) и 3-й канал — данные



Рис. 3. (В цвете онлайн.) Стенды для градуировки газоразрядных счётчиков СТС-6 (а) и телескопов двойных совпадений (б). Чтобы получить однородные радиационные поля, стенд для градуировки газоразрядных счётчиков вращается с частотой примерно три оборота в минуту.

датчика атмосферного давления. Данные каждого полёта радиозонда записываются на компьютер.

Для того чтобы иметь однородный ряд экспериментальных данных на протяжении более 65 лет, была разработана система градуировки счётчиков и телескопов (рис. 3). После введения поправок в скорости счёта одиночного счётчика и телескопа на эффективность этих детекторов можно сравнивать данные, полученные в текущий момент, с данными, полученными в прошлом. В этом состоит понятие однородности длинных рядов экспериментальных данных. Поправки для каждого счётчика и телескопа, используемых в полётах радиозондов, вводятся по среднему счёту пяти контрольных счётчиков и пяти контрольных телескопов.

3. 11- и 22-летний циклы в космических лучах

В гелиосфере потоки КЛ управляются солнечной активностью. Наиболее крупномасштабные изменения солнечной активности происходят в 11-летнем солнечном цикле. Кроме 11-летнего цикла на Солнце наблюдается 22-летний магнитный цикл, который отчётливо проявляется в КЛ [24]. Ниже мы остановимся более детально на долговременных вариациях КЛ в 11- и 22-летних циклах солнечной активности. Этот вопрос весьма актуален сейчас, когда Солнце, по-видимому, вступило в очередной глубокий минимум своей активности (grand solar minimum). Такие минимумы наблюдаются один раз в ≈ 180 лет. Их продолжительность может достигать нескольких десятков лет. Например, минимум Маундера длился с 1645 г. по 1710 г. В этот период на Солнце практически не было солнечных пятен [25]. В последние два минимума солнечной активности (2009 г. и 2020 г.) Солнце являлось очень спокойным и в наших измерениях были зарегистрированы самые высокие потоки КЛ за всю историю их наблюдений (более 60 лет). Высокие потоки КЛ наблюдались нейтронными мониторами и на околоземных космических аппаратах.

Что касается 22-летнего солнечного магнитного цикла, то примерно в максимуме каждого 11-летнего солнечного цикла направления магнитных полей в полярных шапках Солнца меняются на противоположные. Приблизительно можно рассматривать солнечное магнитное поле как диполь в течение почти всего 11-летнего цикла солнечной активности, кроме 2–3 лет максимума сол-

нечной активности. После инверсии солнечного полярного магнитного поля следует смена знаков магнитного поля в гелиосфере. Как будет показано ниже, направления магнитных полей на Солнце и в гелиосфере оказывают существенное влияние на потоки КЛ.

На рисунке 4 показан временной ход величины потоков КЛ (среднемесячные значения) в максимуме их каскадной кривой в атмосфере, N_m . Данные были получены в районе северной (Мурманская область) и южной (Антарктида, станция Мирный) полярных широт, а также на средней северной широте (ДНС ФИАН, Долгопрудный, Московская область). Эти данные приведены на сайте ФИАН [26].

Во временном ходе потока КЛ видно несколько особенностей. Во-первых, в 2009 и в 2020 гг. были зарегистрированы самые высокие уровни потоков КЛ за весь период их наблюдений с 1957 г. Эти потоки оказались примерно на 10–15 % выше потоков, измеренных в мае 1965 г. — в минимуме 20-го цикла солнечной активности.

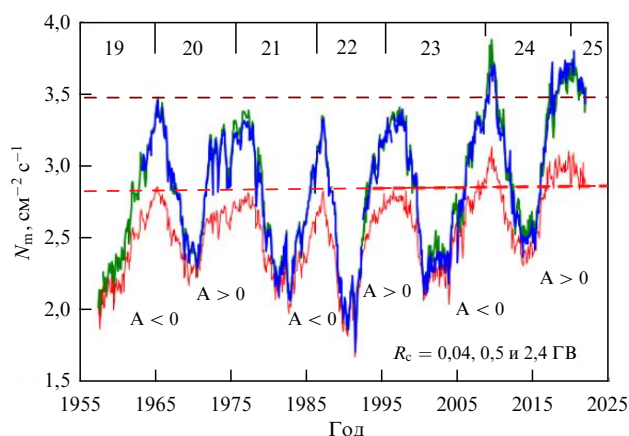


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Временной ход потока КЛ (среднемесячные значения) в максимуме кривой их поглощения в атмосфере, N_m . Данные получены на северной (зелёная кривая, $R_c = 0,5$ ГВ) и южной (синяя кривая, Антарктида, $R_c = 0,04$ ГВ) полярных широтах, а также на средней северной широте (красная кривая, $R_c = 2,4$ ГВ). Штриховые коричневая и красная прямые проведены через максимум потоков КЛ, которые наблюдались в 1965 г. В верхней части рисунка числами 19–25 обозначены номера 11-летних солнечных циклов. $A > 0$ обозначает положительную фазу 22-летнего солнечного магнитного цикла, $A < 0$ — отрицательную (см. текст).

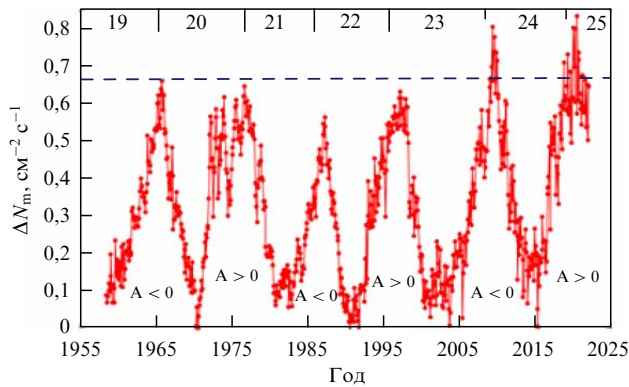


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Временной ход потока КЛ в максимуме их каскадной кривой в атмосфере (вторичные частицы от первичных КЛ с жёсткостью $R = 0,73 - 2,4$ ГВ. Обозначения те же, что и на рис. 4.

Во-вторых, в 11-летних циклах КЛ чередуются пикообразная и платообразная формы зависимостей потоков КЛ от времени. Такого чередования в индексах солнечной активности (например, в числе солнечных пятен) не наблюдается. Различные формы временных зависимостей КЛ обусловлены 22-летним солнечным магнитным циклом. Пикообразная форма наблюдается в отрицательные фазы этого цикла, когда магнитные силовые линии выходят из южной полярной шапки Солнца и входят в северную (обозначается как $A < 0$). Платообразная форма наблюдается в положительные фазы магнитного цикла, когда магнитные силовые линии выходят из северной полярной шапки и входят в южную ($A > 0$). В отрицательные фазы ($A < 0$) ось вращения Солнца Ω направлена против дипольной составляющей солнечного магнитного поля $\mathbf{M}$, т.е. $\Omega \uparrow \mathbf{M}$. В положительные фазы ($A > 0$) $\Omega \uparrow \mathbf{M}$.

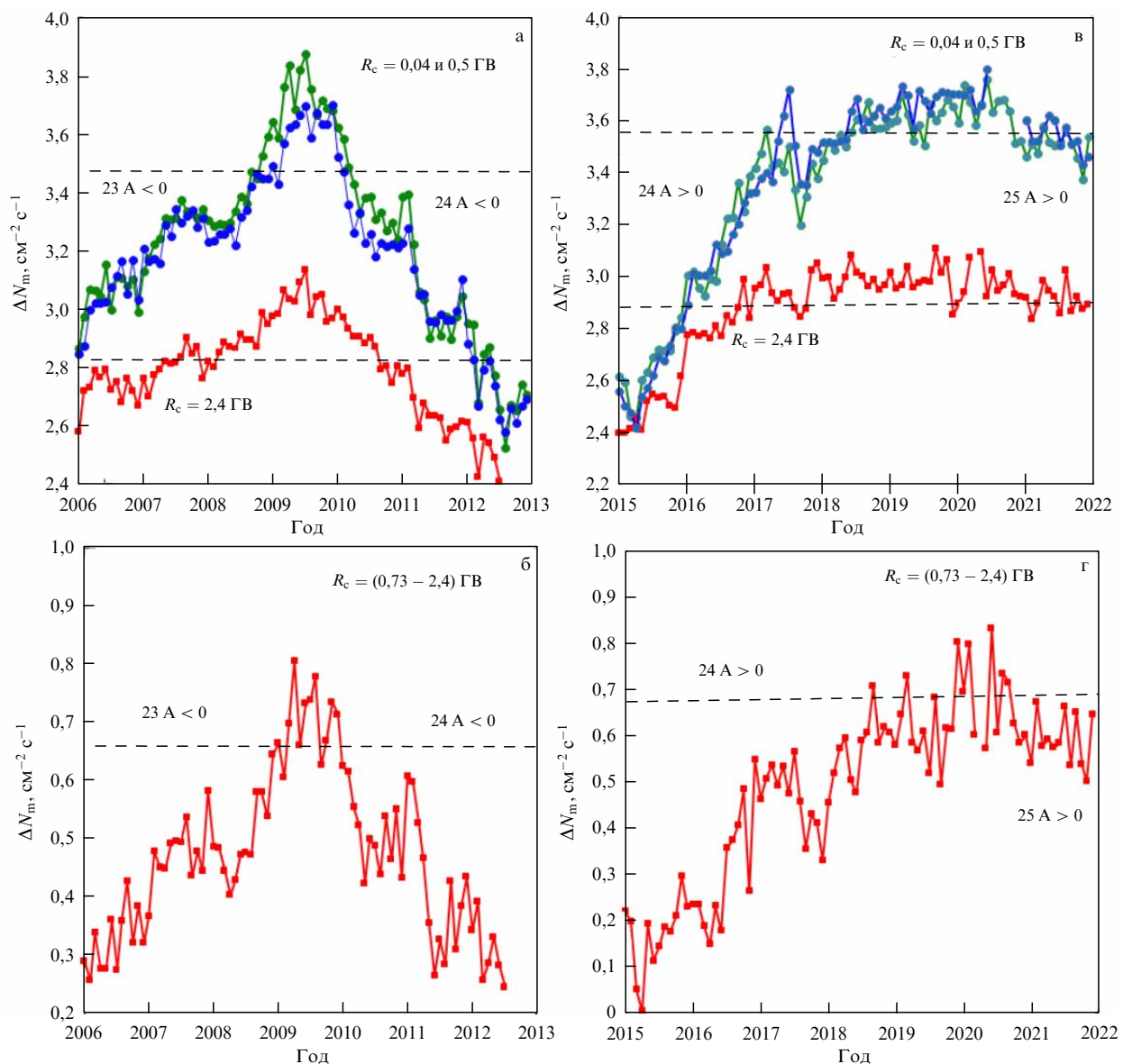


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Среднемесячные временные зависимости потоков КЛ в максимуме их каскадной кривой в атмосфере в минимумах и вблизи минимумов солнечной активности в отрицательные ($A < 0$) (а, б) и положительные ($A > 0$) (в, г) фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла. (а, в) Данные о потоках КЛ, полученные в северных полярных широтах (зелёная кривая, $R_c = 0,5$ ГВ), в Антарктиде (синяя кривая, $R_c = 0,04$ ГВ) и на средней северной широте (красная кривая, $R_c = 2,4$ ГВ). (б, г) Потоки КЛ, образованные в атмосфере первичными протонами и ядрами с жёсткостями $0,73 - 2,4$ ГВ. Числами 23, 24 и 25 обозначены номера 11-летних солнечных циклов. Для сравнения штриховыми прямыми показаны потоки КЛ, измеренные в атмосфере в 1965 г.

На рисунке 5 приведён временной ход потоков КЛ с жёсткостью $R = 0,73\text{--}2,4$ ГВ (для протонов с энергией 250–1500 МэВ). Эти данные представляют собой разности ординат точек зелёной и красной кривых на рис. 3.

Пикообразная и платообразная временные зависимости потоков КЛ в отрицательные и положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла в периоды минимумов солнечной активности и вблизи этих периодов приведены на рис. 6. Отчётливо прослеживаются разные формы представленных временных зависимостей.

Надо отметить, что смена фазы (инверсия) солнечного магнитного цикла происходит в самом максимуме солнечной активности или вблизи него. Инверсии магнитных полей в северной и южной полярных шапках Солнца могут начинаться и заканчиваться в разные времена. Новый солнечный цикл начинается в минимуме солнечной активности. Пятна нового 11-летнего цикла солнечной активности появляются на высоких гелиоширотах ($\varphi \approx 30^\circ$) и затем в процессе развития цикла спускаются на низкие гелиошироты ($\varphi \approx 10^\circ$).

4. Магнитные поля в гелиосфере и процессы, определяющие модуляцию космических лучей

Данные, представленные на рис. 3–6, показывают, что временные зависимости потоков КЛ чередуются, переходя от пикообразной формы при $A < 0$ к платообразной при $A > 0$. Период таких изменений составляет примерно 22 года. Возникает вопрос: что является физической причиной таких изменений в КЛ?

Известно, что КЛ, распространяясь в гелиосфере от её границы до орбиты Земли, испытывают диффузию, конвекцию, адиабатическое замедление (последнее связано с расширением солнечного ветра с вмороженным в него магнитным полем) и дрейфы в квазирегулярном солнечном магнитном поле [27–30]. В гелиосфере имеют место два вида магнитных дрейфов, а именно градиентный магнитный дрейф со скоростью v_g и центробежный дрейф со скоростью v_c [28, 29]. Формулы, описывающие эти явления, имеют следующий вид:

$$v_g = \frac{\alpha^2 \omega_B}{2B^2} [\mathbf{B} \times \nabla B], \quad v_c = \frac{c\gamma m}{q} \frac{(v_{\parallel})^2 [\mathbf{r} \times \mathbf{B}]}{R^2 B^2},$$

где α — питч-угол частицы, B — индукция межпланетного магнитного поля (ММП), $\mathbf{r}$ — радиус кривизны силовой линии ММП, q — заряд частицы, m — её масса, c — скорость света, γ — лоренц-фактор, $\omega_B = qB/(\gamma mc)$ — циклотронная частота частицы в магнитном поле B [29, 30].

Из всех четырёх перечисленных выше процессов, управляющих движением частиц в гелиосфере, от знака заряда частицы зависят только дрейфы. Поэтому естественным было предположение о том, что именно дрейфы частиц в спиральном ММП ответственны за две различные формы временных зависимостей потоков КЛ (см. рис. 3–5).

Общепринятая картина модуляции в гелиосфере частиц с положительным зарядом (протоны и ядра) и отрицательным зарядом (электроны) схематически показана на рис. 7. Видно, что в 22-летнем солнечном магнитном цикле в отрицательные фазы ($A < 0$) протоны и ядра имеют пикообразную временную зависимость

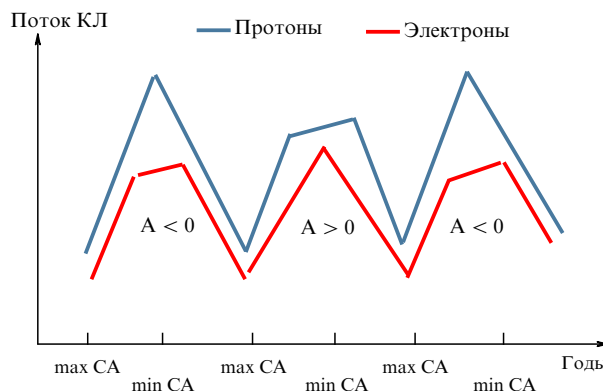


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Схематическое изображение ожидаемого временного хода частиц КЛ с положительным зарядом (протоны и ядра, синяя кривая) и электронов (красная кривая) в отрицательные ($A < 0$) и положительные ($A > 0$) фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла. Обозначения "max CA" и "min CA" соответствуют периодам максимумов и минимумов солнечной активности. Временной промежуток между последовательными max CA (min CA) составляет около 11 лет.

(синяя кривая), а для электронов ожидается платообразная форма (красная кривая). В положительные фазы ($A > 0$) картина меняется на противоположную [28].

Согласно принятым представлениям, различие в ожидаемом поведении частиц КЛ с электрическими зарядами разного знака вызвано тем, что в гелиосфере при $A < 0$ дрейфовые потоки протонов и ядер направлены от низких гелиоширот (от гелиосферного токового слоя — ГТС) к высоким, а дрейфовые потоки электронов, наоборот, направлены от высоких гелиоширот к низким (к ГТС). При $A > 0$ картина становится противоположной: дрейфовые потоки протонов и ядер направлены от высоких гелиоширот к низким (к ГТС), а дрейфовые потоки электронов — от низких гелиоширот (от ГТС) к высоким.

Связь направлений магнитных полей в полярных шапках на Солнце, в гелиосфере и направлений дрейфовых токов для протонов и электронов схематически показана на рис. 8а,б: положительная фаза 22-летнего солнечного магнитного цикла ($A > 0$) — на рис. 8а, а отрицательная ($A < 0$) — на рис. 8б. Штриховая и сплошная вертикальные стрелки показывают направления оси вращения Солнца Ω и его дипольного магнитного момента $\mathbf{M}$ соответственно. В положительные фазы $\Omega \uparrow \mathbf{M}$, в отрицательные $\Omega \downarrow \mathbf{M}$. Направления дрейфовых токов частиц с электрическим зарядом $q > 0$ показано прямыми стрелками с левой стороны от Солнца, а для частиц с $q < 0$ — с правой стороны от него (штриховые стрелки). На рисунках 8в,г показан ожидаемый временной ход частиц с $q > 0$ (протоны и ядра) и с $q < 0$ (электроны) в положительные и отрицательные фазы солнечного магнитного цикла. Согласно дрейфовой теории, временные зависимости для частиц КЛ, имеющих электрические заряды разного знака, различаются по форме. Особенно это различие заметно, если рассматривать отношение потока частиц с $q > 0$ к потоку частиц с $q < 0$ (рис. 8д,е).

Транспортное уравнение, описывающее движение частиц в гелиосфере, не имеет аналитического решения и решается численными методами. Уравнение содержит достаточно много параметров, подбором которых уда-

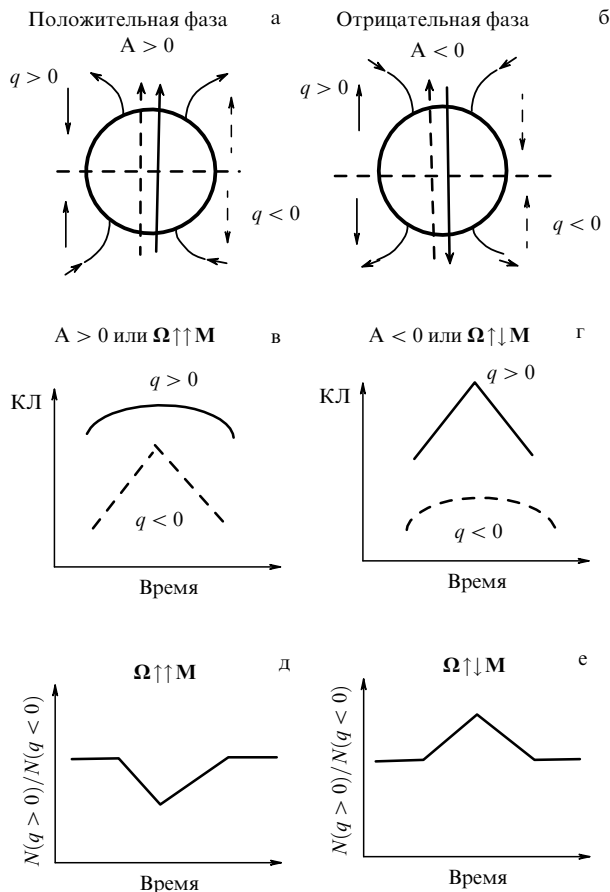


Рис. 8. (а, б) Схематическое изображение 22-летнего солнечного магнитного цикла в его положительные ($A > 0$) фазы (а) и отрицательные ($A < 0$) фазы (б). Круг — Солнце, кривые со стрелками показывают направление солнечного магнитного поля в полярных шапках на Солнце и в гелиосфере. Штриховая и сплошная стрелки в круге обозначают ось вращения Солнца Ω и направление его дипольного магнитного момента $\mathbf{M}$ соответственно. В положительные фазы ($A > 0$) эти векторы однонаправлены, $\Omega \uparrow \uparrow \mathbf{M}$, а в отрицательные ($A < 0$) — противоположены, $\Omega \uparrow \downarrow \mathbf{M}$. Направления дрейфовых токов КЛ в северной и южной частях гелиосферы показаны вертикальными стрелками, на рис. а сплошные отрезки — для частиц с $q > 0$, на рис. б штриховые — для частиц с $q < 0$. (в, г) Временные зависимости потока частиц КЛ на орбите Земли с электрическими зарядами $q > 0$ и $q < 0$ в положительные ($A > 0$) и отрицательные ($A < 0$) фазы этого цикла согласно дрейфовой теории. (д, е) Отношение потока протонов и ядер к потоку электронов $N(q > 0)/N(q < 0)$ в зависимости от времени в положительных ($A > 0$) и отрицательных ($A < 0$) фазах 22-летнего солнечного магнитного цикла.

ётся описать пикообразную и платообразную формы временного хода потоков протонов и ядер в КЛ согласно вышеописанному сценарию [28].

5. Что показывают экспериментальные данные?

К настоящему времени накоплен достаточно большой объём экспериментальных данных по электронам и появилась возможность сравнения временных зависимостей потоков КЛ с разными по знаку электрическими зарядами. Рисунок 9 иллюстрирует это сравнение. Красная кривая показывает временной ход вторичных КЛ, образованных протонами и ядрами с жёсткостью $R = 0,7–2,5$ ГВ [26]. Разность потоков частиц, измерен-

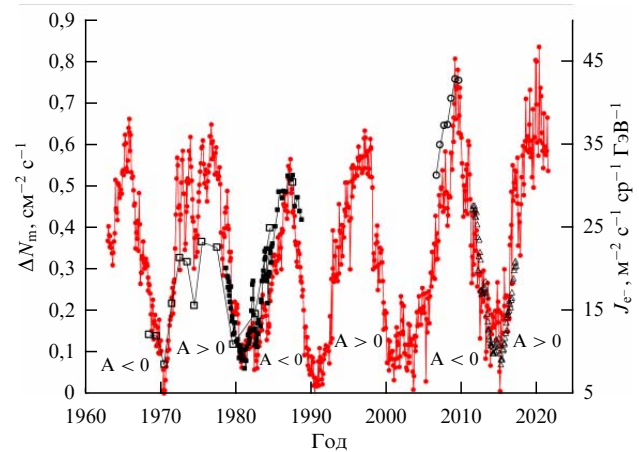


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Временной ход потока вторичных частиц в атмосфере, образованных первичными КЛ с жёсткостями 0,73–2,5 ГВ (среднемесячные значения, красные кружки, левая ось) [26]. Поток электронов показан символами чёрного цвета (правая ось): полые квадраты — электроны с $R_e = 0,9–1,1$ ГВ, полученные на баллонах [29]; закрашенные квадраты — электроны с жёсткостями $R_e = 0,9–1,1$ ГВ, полученные на спутнике [29]; полые кружки — электроны с $R_e = 0,9–1,1$ ГВ (эксперимент PAMELA [31]); полые треугольники — электроны с $R_e = 1,0–1,2$ ГВ (спектрометр AMS-02 на борту Международной космической станции) [32].

ных в максимуме переходных кривых в атмосфере в полярных широтах и на средней широте (см. рис. 4), даёт поток частиц в вышеуказанном интервале жёсткостей. На рисунке 9 показаны также потоки электронов с жёсткостью 1,0–1,1 ГВ, полученные в разное время на баллонах (полые квадраты), спутниках (закрашенные квадраты) и в последние 20 лет в космических экспериментах PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) (полые кружки) и AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer 02) (полые треугольники).

Из сравнения временных зависимостей потоков КЛ с $q > 0$ и $q < 0$ можно сделать вывод, что эти зависимости имеют один и тот же вид. Действительно, в период с 06.1972 г. по 06.1977 г. наблюдается плато как для протонов, так и для электронов. Пикообразные временные зависимости для этих частиц наблюдаются в середине 1980-х годов и в 2008–2010 гг. Данный результат противоречит утверждению дрейфовой теории, что частицы с противоположными электрическими зарядами модулируются по-разному. Из приведённых данных можно сделать вывод, что модуляция частиц с электрическими зарядами разного знака в гелиосфере происходит одинаковым образом [33]. Надо отметить, что в работе [34] сделан противоположный вывод.

Наличие пикообразной и платообразной форм временных зависимостей потока КЛ, по-видимому, не связано с дрейфовыми токами. Возможное объяснение этих форм дано ниже. Одинаковые временные зависимости для частиц с разными по знаку электрическими зарядами в 22-летнем солнечном магнитном цикле не отрицают существования дрейфов.

Для качественного объяснения двух разных форм временных зависимостей потока КЛ в периоды с $A > 0$ и $A < 0$ воспользуемся гипотезой, высказанной К. Нагасимой и Г.Ф. Крымским о существовании открытой и закрытой гелиосферы [35, 36].

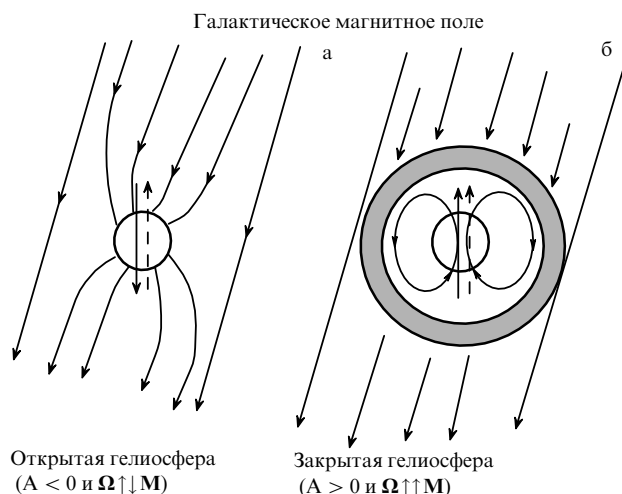


Рис. 10. Схематический вид открытой (а) и закрытой (б) гелиосферы. В центре — Солнце. Штриховая стрелка — ось его вращения Ω , сплошная стрелка — дипольный магнитный момент Солнца $\mathbf{M}$. Кольцо, показанное серым цветом на рис. б, обозначает область отсутствия пересоединения солнечного и галактического магнитных полей и образование магнитного барьера для КЛ.

Предполагается, что в отрицательные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла ($A < 0$ и $\Omega \uparrow \downarrow \mathbf{M}$) происходит пересоединение магнитных силовых линий гелиосферного и галактического магнитных полей. Пересоединение происходит на расстояниях ~ 100 а.е. на гелиоширотах выше зоны пятнообразования, т.е. на гелиоширотах $\lambda > 10-15^\circ$. Область образования солнечных пятен приблизительно через четыре года после переполюсования магнитного поля Солнца (после максимума солнечной активности) спускается на гелиошироты $\lambda \approx 10-12^\circ$. Вне этой области может происходить пересоединение. Образуется открытая гелиосфера, и частицы КЛ могут поступать в гелиосферу достаточно быстро. Схематически этот процесс представлен на рис. 10а.

В положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла ($A > 0$ и $\Omega \uparrow \uparrow \mathbf{M}$) пересоединение магнитных силовых линий гелиосферного и галактического магнитных полей на границе гелиосферы отсутствует (закрытая гелиосфера) (рис. 10б). На этой границе образуется сферический магнитный барьер достаточно большой толщины (несколько десятков астрономических единиц (а.е.)). Возможно, магнитный барьер занимает область от внутренней ударной волны (termination shock, $r \approx 85$ а.е.) до гелиопаузы ($r \approx 125$ а.е.) [37]. Через этот барьер частицы КЛ диффундируют достаточно медленно, что и создаёт платообразную форму временной зависимости потоков КЛ на орбите Земли как для протонов и ядер, так и для электронов.

Надо отметить, что в минимуме 24-го солнечного цикла (2008–2010 гг.) и в минимуме 25-го солнечного цикла (2019–2021 гг.) солнечное полярное магнитное поле было слабым по сравнению с таковым, наблюдавшимся в предыдущие минимумы солнечной активности [38]. Поэтому во временном ходе КЛ эффект магнитного барьера (отсутствие пересоединения магнитных полей) в последней, положительной, фазе 22-летнего солнечного магнитного цикла (2013–2025 гг.) был менее ярко выражен. Это можно увидеть, например, на рис. 4 при

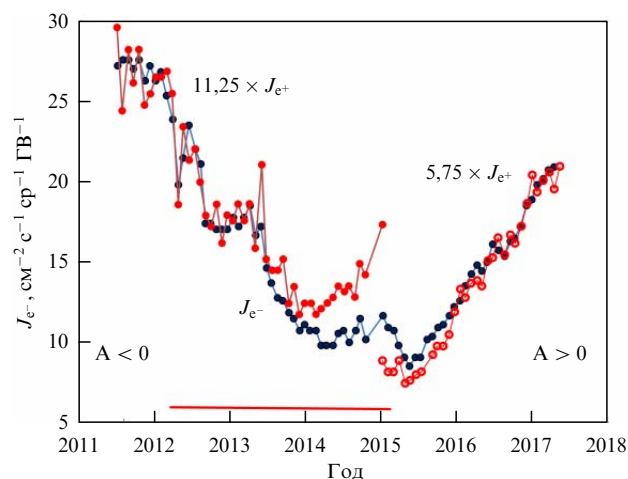


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Временной ход потока позитронов (красные кружки) и потока электронов (чёрные кружки) с жесткостью $R_e = 1,01-1,22$ ГВ [32]. Поток позитронов нормирован по отношению к потоку электронов (см. текст). Горизонтальная красная линия обозначает период инверсии полярных магнитных полей на Солнце.

сравнении плато в КЛ, которые наблюдались в период 1974–1977 гг. и в 2019–2021 гг.

Крупномасштабные модуляционные эффекты в КЛ связаны с перестройкой магнитных полей на Солнце и в гелиосфере. Рисунок 11 показывает временной ход потоков электронов и позитронов. Данные об этих потоках взяты из [32]. Период 2011–2015 гг. относится к возрастающей ветви солнечной активности 24-го одиннадцатилетнего цикла, когда наблюдалось уменьшение потока КЛ. Период 2011–2013 гг. соответствует отрицательной фазе 22-летнего солнечного магнитного цикла ($A < 0$). В то время конфигурация магнитного поля в гелиосфере была устойчивой, дрейфовая скорость электронов была направлена от высоких гелиоширот к гелиосферному токовому слою, а у позитронов (как и у протонов и ядер), наоборот, — от ГТС к высоким гелиоширотам. Для этого периода поток позитронов J_{e^+} нормирован по отношению к потоку электронов J_{e^-} : $J_{e^-} = \kappa J_{e^+}$. Величина $\kappa = 11,2$ была вычислена по временному интервалу 2011.5–2013.3. Видно, что временные изменения потоков электронов и позитронов происходят синхронно с середины 2011 г. по середину 2013 г.

Период с 2015 г. по 2018 г. соответствует ветви спада солнечной активности и положительной фазе 22-летнего солнечного магнитного цикла ($A > 0$). В данный период наблюдался рост потоков КЛ. Поток позитронов был также нормирован к потоку электронов, $J_{e^-} = \kappa_1 J_{e^+}$. Величина $\kappa_1 = 5,75$ была вычислена по временному интервалу 2017.0–2017.4. Из рисунка 11 видно, что с конца 2015 г. по середину 2017 г. наблюдается синхронность во временных изменениях потоков электронов и позитронов. В указанный период конфигурация магнитного поля в гелиосфере была устойчивой, но по сравнению с периодом 2011–2013 гг. направления дрейфовых токов сменились противоположными: дрейфовый ток позитронов был направлен от высоких гелиоширот к ГТС, а дрейфовый ток электронов, наоборот, — от ГТС к высоким гелиоширотам. Потоки позитронов стали расти быстрее потоков электронов.

В 2012 г. началась инверсия магнитного поля на Солнце [38, 39]. Продолжительность инверсии солнечного полярного магнитного поля показана на рис. 11 горизонтальной линией. В северной полярной шапке Солнца этот процесс занял почти три года (начало 2012 г. – начало 2015 г.). В южной полярной шапке инверсия произошла достаточно быстро в мае 2013 года [38].

После начала инверсии на Солнце (примерно через год, с середины 2013 г.) началась перестройка магнитных полей в гелиосфере, которая закончилась в ноябре 2015 г. Гелиосфера простирается до гелиопаузы ($r \approx 120$ а.е.), после которой начинается межзвёздная среда. Примерно год требуется солнечному ветру с замороженным в него магнитным полем, для того чтобы достичь гелиопаузы.

В гелиосфере после окончания перестройки магнитного поля установилась новая конфигурация магнитного поля и гелиосфера стала закрытой ($A > 0$). Направления дрейфовых токов поменялись на противоположные: дрейфовый ток позитронов был направлен от высоких гелиоширот к ГТС, а дрейфовый ток электронов, наоборот, — от ГТС к высоким гелиоширотам. Потоки позитронов стали расти быстрее потоков электронов.

Из данных, представленных на рис. 11, можно увидеть, что потоки электронов и позитронов (последние нормированы к отношению к потоку электронов в 2011 г.) начали расходиться в середине 2013 г. Это произошло примерно через год после начала инверсии магнитного поля в северных полярных районах Солнца (начало 2012 г.), когда КЛ "почувствовали" перестройку магнитных полей в гелиосфере. На Солнце инверсия магнитного поля завершилась в начале 2015 г., а перестройка в гелиосфере — в конце 2015 г. До начала и после окончания инверсии магнитных полей в гелиосфере (середина 2013 г. и конец 2015 г. соответственно) временные зависимости потоков электронов и позитронов являются подобными. В период перестройки гелиосферных магнитных полей (середина 2013 г. – конец 2015 г.) электроны и позитроны ведут себя по-разному.

6. Заключение

Проведён анализ экспериментальных данных по КЛ, полученных по измерениям в атмосфере, и данных по электронам (измерения на баллонах и спутниках). В атмосфере измерялись вторичные заряженные частицы, образованные протонами и ядрами, т.е. космическими частицами (КЛ) с положительными электрическими зарядами. Показано, что частицы с разными по знаку электрическими зарядами модулируются солнечной активностью одинаковым образом. В положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла временные зависимости частиц обоих знаков имеют платообразный характер в минимуме солнечной активности и вблизи него в течение приблизительно четырёх лет. В отрицательные фазы солнечного магнитного цикла наблюдается пикообразная временная зависимость для частиц обоих знаков.

Для объяснения наблюдаемого эффекта предполагается, что в отрицательные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла ($\Omega \uparrow \downarrow \mathbf{M}$) происходит пересоединение магнитных силовых линий галактического и солнечного магнитных полей и гелиосфера становится открытой. КЛ свободно проникают в неё, и наблюдается пикообразная временная зависимость потока частиц КЛ независимо от

знака их электрического заряда. В положительные фазы магнитного цикла на Солнце ($\Omega \uparrow \uparrow \mathbf{M}$) пересоединение отсутствует и гелиосфера является закрытой для КЛ. Космические частицы, прежде чем попасть в гелиосферу, должны преодолеть диффузионный магнитный барьер. Этот барьер даёт платообразный временной ход потока КЛ независимо от знака электрического заряда частиц.

Представленные в настоящей статье экспериментальные данные по КЛ в земной атмосфере были получены двумя поколениями научных сотрудников, инженеров и техников. Авторы выражают им свои признательность и благодарность.

Список литературы

1. Бриккер С И и др. *ДАН СССР* **57** 141 (1947)
2. Вернов С Н, Куликов А М *ДАН СССР* **61** 1013 (1948)
3. Барадзей Л Т, Вернов С Н, Смородин Ю А *ДАН СССР* **62** 465 (1948)
4. Вернов С Н, Григоров Н Л, Чарахчян А Н *Вестн. МГУ* (11) 71 (1949)
5. Алексеева К И, Вернов С Н *ДАН СССР* **69** 317 (1949)
6. Григоров Н Л, Евреина И М, Соколов С П *ДАН СССР* **81** 379 (1951)
7. Алексеева К И, Григоров Н Л *ДАН СССР* **115** 259 (1957)
8. Григоров Н Л и др. *УФН* **131** 521 (1980); Grigorov N L et al. *Sov. Phys. Usp.* **23** 426 (1980)
9. Stozhkov Yu I et al. *Nuovo Cimento C* **18** 335 (1995)
10. Стожков Ю И др. *Геомагнетизм и астрономия* **36** (4) 211 (1996)
11. Ermakov V I Stozhkov Y I, in *Proc. of the 11th Intern. Conf. Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama* (NASA/CP-1999-209261, Ed. H J Christian) (Guntersville, AL: NASA, 1999) p. 242
12. Ермаков В И, Стожков Ю И "Механизм образования электричества грозных облаков (Mechanism of thundercloud electricity production)", Препринт № 25 (М.: ФИАН, 2002)
13. Stozhkov Y I *J. Phys. G* **29** 913 (2003)
14. Бабарыкин В К и др. *Геомагнетизм и астрономия* **4** (3) 485 (1964)
15. Стожков Ю И, Чарахчян А Н, в сб. *Антарктика* Вып. 10 (М.: Наука, 1971) с. 16
16. Голенков А Е и др. *Труды ФИАН* **122** 3 (1980)
17. Shea M A et al., in *Proc. of the 20th Intern. Cosmic Ray Conf., Moscow, 1987* Vol. 4 (Moscow: Nauka, 1987) p. 201
18. Golenkov A E et al., in *Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conf., Adelaide, Australia, 1990* Vol. 7 (Adelaide: Physics Publ. Univ. Adelaide, 1990) p. 14
19. Птицына К В, Троицкий С В *УФН* **180** 723 (2010); Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Usp.* **53** 691 (2010)
20. Панасюк М И, Мирошниченко Л И *УФН* **192** 413 (2022); Panasyuk M I, Miroshnichenko L I *Phys. Usp.* **65** 379 (2022)
21. Bazilevskaya G A et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e28033 (2020)
22. Makhmutov V S et al. *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* **149** 258 (2016)
23. Свиржевская А К, Стожков Ю И, в сб. *Труды Всесоюзной конф. по физике космических лучей, Ташкент, 1968* Ч. 2 (М.: ФИАН, 1969) Вып. 3, с. 63
24. Cliver E W, in *The Solar Activity Cycle: Physical Causes and Consequences* (Space Science Series of ISSI, Vol. 53, Eds A Balogh et al.) (New York: Springer, 2015) p. 169
25. Glette F et al., in *The Solar Activity Cycle: Physical Causes and Consequences* (Space Science Series of ISSI, Vol. 53, Eds A Balogh et al.) (New York: Springer, 2015) p. 35
26. Долгопрудненская научная станция имени С.Н. Вернова. Лаборатория физики Солнца и космических лучей. Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, https://sites.lebedev.ru/DNS_FIAN
27. Parker E N *Interplanetary Dynamical Processes* (New York: Interscience Publ., 1963); Пер. на русск. яз.: Паркер Е Н *Динамические*

- процессы в межпланетной среде (Пер. с англ. под ред. Л. И. Дормана) (М.: Мир, 1965)
28. Potgieter M S, Vos E E *Astron. Astrophys.* **601** A23 (2017)
 29. Tuska E B "Charge-sign dependent solar modulation of 1–10 GeV cosmic rays", Ph.D. Thesis (Dissertation Abstracts Intern., Vol. 52-02, Sect. B, p. 0890) (Newark: Univ. of Delaware, 1990)
 30. Rossi B, Olbert S *Introduction to the Physics of Space* (New York: McGraw-Hill, 1970); Пер. на русск. яз.: Росси Б, Ольберт С *Введение в физику космического пространства* (М.: Атомиздат, 1974)
 31. Adriani O et al. *Astrophys. J.* **810** 142 (2015)
 32. Aguilar M et al. *Phys. Rep.* **894** 1 (2021)
 33. Стожков Ю И и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **85** 1359 (2021); Stozhkov Yu I et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **85** 1049 (2021)
 34. Heber B et al. *Astrophys. J.* **699** 1956 (2009)
 35. Nagashima K, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 10 (Budapest: Dept. of Cosmic Rays, Central Research Inst. for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 380
 36. Крымский Г Ф *Геомагнетизм и аэрономия* **21** 923 (1981)
 37. Cumming A C et al. *Astrophys. J.* **831** 18 (2016)
 38. The Wilcox Solar Observatory, <http://wso.stanford.edu>
 39. Мордвинов А В, Головкин А А, Язев С А, в сб. *Солнечно-земная физика* Вып. 25 (138) (Отв. ред. А В Михалев) (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014) с. 3

Balloon studies of cosmic rays at the Lebedev Physical Institute, RAS

Yu.I. Stozhkov^(a), V.S. Makhmutov^(b), N.S. Svirzhevsky^(c)

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: (a) stozhkovyi@lebedev.ru, (b) makhmutovvs@lebedev.ru, (c) svirzhevskyns@lebedev.ru

Regular measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere have been performed at the Lebedev Physical Institute since 1957. These experiments are briefly described. In the atmosphere, secondary fluxes of charged particles are detected, which are mainly (more than 99%) produced by primary protons and nuclei. Long-term (11- and 22-year) changes in cosmic ray fluxes in the atmosphere produced by primary protons and nuclei and in primary electron fluxes are analyzed. Data on primary electrons are obtained using high-altitude balloons and satellites. The analysis shows that the time dependences of positively and negatively charged particles in the heliosphere have the same form, i.e., they are modulated in the same way. This result contradicts the generally accepted model of cosmic ray modulation in the heliosphere, which should be significantly modified.

Keywords: cosmic rays, solar activity, heliosphere, modulation

PACS numbers: 96.50.S – , 96.50.Xy, 96.60.lv

Bibliography — 39 references

Received 18 April 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (9) 1054–1063 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (9) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.06.039215>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.06.039215>