

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, Р. Т. Гущина, Л. И. Дорман, В. А. Оленева, В. Г. Янке

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Изучение вариаций интенсивности космических лучей составляет особый раздел физики космических лучей. Можно сказать, что в течение последних лет изучение вариаций космических лучей всё более превращается в независимый метод прощупывания физических условий в межпланетной и межзвёздной среде. Здесь применяется новый количественный метод, который независимо от других (оптический, радиоастрономический и т. п.) позволяет определять некоторые интересные астрофизические характеристики. Описаны достижения отдела космических лучей ИЗМИРАН за последние 25...30 лет в широчайшем диапазоне научных и прикладных направлений.

Ключевые слова: вариации космических лучей, форбуш-эффекты, сеть нейтронных мониторов, анизотропия космических лучей, предвестники межпланетных возмущений, барометрический эффект, наземные возрастания солнечных космических лучей, мюонные телескопы, базы данных детекторов космических лучей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время непрерывное наблюдение вариаций космических лучей (КЛ) ведётся сетью специальных детекторов, регистрирующих в основном умеренно жёсткую компоненту КЛ в области энергий (1...100 ГэВ), которая является как бы продолжением энергетического диапазона спутниковых наблюдений.

Мировая сеть насчитывает около 50 действующих нейтронных мониторов, среди которых 14 непрерывно работают на российских станциях космических лучей.

На рис. 1 приведена карта распределения детекторов КЛ по земному шару с нанесёнными изолиниями жёсткостей геомагнитного обрезания, которые являются своеобразной магнитной характеристикой каждой точки Земли для приходящих заряженных космических частиц. Как видно, российские станции занимают довольно обширную область на Земле: от 78N

Белов Анатолий Владимирович — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, abelov@izmiran.ru

Ерошенко Евгения Александровна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Гущина Раиса Тихоновна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Дорман Лев Исаакович — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник

Оленева Виктория Александровна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

Янке Виктор Гугович — заведующий отделом, кандидат физико-математических наук, yanke@ismiran.ru

и 67S-полярных широт (Баренцбург и Мирный) до 43N (6,4 ГВ) — Баксан; от 14E (Баренцбург) до 180E (мыс Шмидта), сканируя при этом более половины небесной сферы по долготе. ИЗМИРАН (отдел космических лучей) имеет самое непосредственное отношение к созданию этих станций и развитию на многих из них научных исследований наблюдаемых вариаций. История создания российской сети подробно описана в работах [Белов, 2010; Белов и др., 1989; Dorman, Dorman, 2014; Eroshenko et al., 2009].

Со времени первого обсуждения вопроса об организации станции космических лучей (1 октября 1943 г., Косулино) и принятия решения о создании лаборатории по исследованию вариаций космических лучей под руководством Е. С. Глоковой (Научно-исследовательский институт земного магнетизма Главного управления гидрометеорологической службы при Совнаркоме СССР (НИИЗМ), 11 апреля 1944 г.) прошло более семидесяти лет. За это время была создана целая сеть нейтронных мониторов, оснащённая с 1957 г. мониторами МГГ, а затем, с 1960-х гг. — нейтронными супермониторами NM64. Ключевыми фигурами в создании советской сети нейтронных мониторов (НМ) стали С. Н. Вернов и Н. В. Пушков. Уже в те годы Н. В. Пушков считал, что для объективного и качественного прогноза солнечно-земных явлений необходимы фундаментальные исследования и комплексные наблюдения различных параметров. При планировании новых комплексных магнито-ионосферных станций (сети обсерваторий) в реестр необходимых исследований включались также наблюдения Солнца и космических лучей.

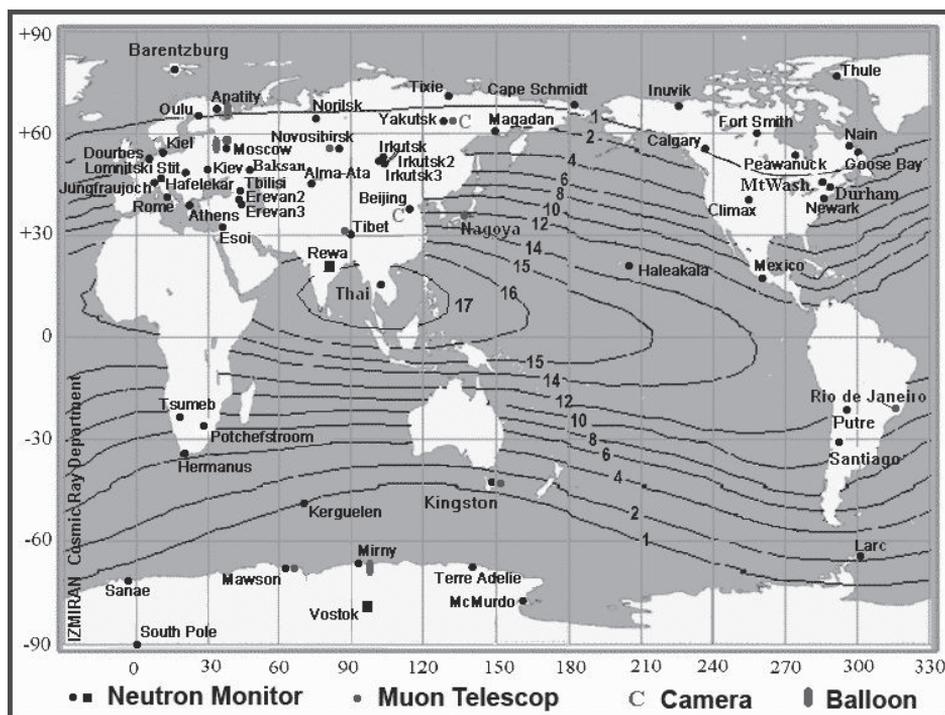


Рис. 1. Распределение детекторов космических лучей по земному шару

Основным разработчиком и создателем ионизационных камер был Ю. Г. Шафер, который с 1962 г. возглавил Институт космофизических исследований и аэронавтики (ИКФИА) в Якутске. Лаборатория КЛ в НИИЗМ переросла в отдел космических лучей ИЗМИРАН, в настоящее время состоящий из трёх лабораторий: экспериментальных методов, исследования вариаций КЛ, астрофизических исследований. Под руководством профессора Л. И. Дормана (старейшего сотрудника отдела), по теме вариаций космических лучей защищены десятки кандидатских диссертаций (не только сотрудниками ИЗМИРАН, но и учёными из других российских и зарубежных институтов). В последние годы (2005–2014) при определяющем участии сотрудников ИЗМИРАН в рамках международного сотрудничества подготовлены и защищены шесть кандидатских диссертаций в группе космических лучей Афинского университета.

Начиная с 1994 г. отдел широко развивает международное сотрудничество с Германией, США, Швейцарией, Италией, Грецией, Финляндией, Болгарской академией наук, Израилем, Китаем, Казахстаном.

В эти же годы начинается участие в Международных проектах (European Office of Aerospace Research and Development (EOARD), International Association for the Promotion of Cooperation with Scientists from the New Independent States of the Former Soviet Union (INTAS), Framework Programme (FP-7)).

Число научных публикаций сотрудников отдела достигает нескольких тысяч, результаты работы описаны также в десятках монографий.

1. МЕТОДЫ

В первые годы огромный материал, накапливающийся при непрерывной регистрации нейтронными мониторами, производил впечатление слабо систематизированного нагромождения данных. Затем были обнаружены сезонные, суточные, одиннадцатилетние, полусуточные, 27-дневные вариации интенсивности, вариации интенсивности во время магнитных бурь, во время солнечных хромосферных выбросов, изменение амплитуды и фазы суточной вариации во время магнитных бурь и т. п. Очень часто эти данные, полученные разными исследователями, представляли как взаимно противоречивые. Для более детального анализа нужно было понять природу всех наблюдаемых вариаций, и прежде всего, аккуратно исключить из наблюдаемых вариаций эффекты атмосферного происхождения. Однако именно здесь долгое время и существовало крайне запутанное положение. Методы, предлагаемые различными авторами, давали совершенно противоречивые результаты. Так продолжалось до тех пор, пока Л. И. Дорман не разработал теорию атмосферных эффектов, на основе которой был создан метод учёта и исключения метеорологических вариаций. Этот метод, значительно усовершенствованный [Дорман, 1972; Dorman, 2004] успешно используется и в настоящее время, позволяя получать связную картину по разным типам вариаций вторичных КЛ.

Второй решающий шаг в исследовании вариаций КЛ, позволивший получать параметры КЛ за пределами атмосферы и магнитосферы Земли,

т.е. практически в межпланетном пространстве, — это введение функций связи и приёмных коэффициентов, учитывающих влияние атмосферы [Дорман, Фейнберг, 1956; Clem, Dorman, 2000; Dorman, 2004] и магнитосферы на приходящие к Земле частицы в разных точках наблюдения. Это позволило использовать всю сеть НМ как единый многоканальный прибор и с помощью метода глобальной съёмки получать характеристики КЛ за каждый час с высокой точностью (0,1...0,2 %). Метод впервые был разработан и использован в Якутске, но в ИЗМИРАНе в 1970-х гг. была предложена своя модификация, которая используется и по сей день [Belov et al., 2005], конечно, с периодическими усовершенствованиями. Метод глобальной съёмки можно рассматривать как величайшее достижение, позволившее из, казалось бы, бессистемного нагромождения данных выделять ряд параметров КЛ за пределами земной магнитосферы и затем использовать их для исследования различных корреляций с параметрами межпланетной среды. Как уже было отмечено, в самом начале исследования КЛ было обнаружено несколько типов их вариаций [Дорман, 1957]. И работа отдела все эти годы строилась на изучении отдельных типов вариаций КЛ и их связи с солнечной и геомагнитной активностью и с параметрами межпланетной среды. Разнообразие этих связей и объём полученных результатов настолько велики, что здесь нельзя ограничиться простым перечислением через запятую. Поэтому далее рассмотрим достижения отдела по различным направлениям после 1989 г., поскольку предыдущие результаты описаны в статье [Белов и др., 1989].

2. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В последние 20 лет создана и постоянно совершенствуется полуэмпирическая модель долговременной модуляции КЛ, описывающая поведение плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ в шести последних циклах солнечной активности (СА) (рис. 2). Модель основана на данных мировой сети нейтронных мониторов и индексах солнечной активности. Основными используемыми параметрами солнечной активности являются характеристики солнечного магнитного поля, вычисленные на поверхности источника солнечного ветра: величина полярных магнитных полей Солнца H_{pol} , наклон гелиосферного токового слоя η , средняя интенсивность магнитного поля B_{SS} и т.д. Учёт воздействия транзитных солнечных явлений на КЛ осуществляется с помощью использования различных индексов, учитывающих частоту и мощность солнечных вспышек и корональных выбросов.

Предложенная в ИЗМИРАН многопараметрическая модель позволила адекватно описать наблюдаемые вариации КЛ даже в период аномального спада и минимума СА в последнем (23-м) цикле. Наклон гелиосферного токового слоя η , полученный на расстоянии $R = 3,25R_o$, позволяет в минимуме 23-го цикла наилучшим образом представить картину модуляции КЛ. Вклад в модуляцию КЛ от изменений B_{SS} , ZO и H_{pol} на спаде 23-его цикла ниже, чем в соответствующих периодах предыдущих циклов. Но это компенсируется увеличенным (по сравнению с минимумами других циклов) вкладом от изменений наклона η .

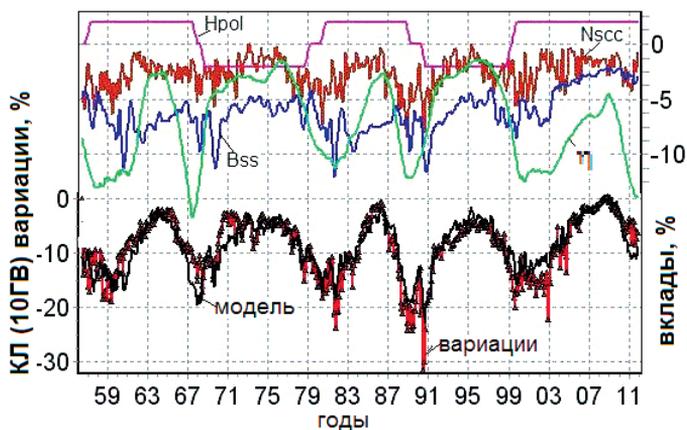


Рис. 2. Модуляция КЛ в 19–24-м циклах солнечной активности: модель (чёрная линия) и наблюдения вариаций КЛ с жёсткостью 10 ГВ (красная линия) (внизу); вклады в модуляцию от индексов, использованных при построении модели, H_{pol} , η , B_{ss} и N_{sc} (вверху)

По всей имеющейся информации о вариациях космического излучения, полученной наземной сетью нейтронных мониторов и с помощью околоземных наблюдений КЛ (в стратосфере и на спутниках) были определены параметры спектра долговременных вариаций галактических КЛ (ГКЛ) для 1953–2010 гг. [Gushchina et al., 2003]. Кроме того, другим способом получен спектр долгопериодных вариаций плотности КЛ в 1974–2012 гг. с привлечением данных мюонного телескопа (станция Nagoya, 17 различных направлений прихода частиц). Получено, что в минимуме 23-го цикла (2009.) по наземным данным зафиксировано превышение ранее установленного максимального уровня потоков КЛ с энергией около 10 ГВ на 5 %, а по измерениям в стратосфере поток галактических КЛ с энергиями свыше 100 МэВ вырос на 20 %.

Исследование долговременного поведения КЛ с жёсткостью 10 ГВ в последних пяти циклах СА (19–23-м) с помощью средних $A10_m$ и экстремальных $A10$ значений интенсивности КЛ показало, что величины $A10_m$, будучи характеристикой мощности цикла КЛ, существенно различаются в рассмотренных циклах СА, они могут быть полезным индексом солнечной активности. Изменения $A10_m$ не совпадают с изменениями средних значений такой характеристики локальных солнечных полей, как числа солнечных пятен.

В ранний период развития космических исследований часто приходилось слышать, что измерения космических лучей на спутниках Земли и других космических аппаратах быстро заменят наземные измерения. Казалось, что прямые наблюдения первичных КЛ намного надёжнее и информативнее возни с вторичными компонентами. Однако жизнь показала, что это не так. Выяснилось, что разные типы измерений КЛ не могут вполне заменять друг друга, зато способны друг друга хорошо дополнять: чем важнее и продолжительнее космическая миссия, тем более нуждается она в наземной поддержке, тем чаще востребованы данные тех же нейтрон-

ных мониторов. Примером такой миссии может послужить чрезвычайно успешный полёт аппарата *Ulysses*, который, во многом, обеспечил современное понимание структуры гелиосферы и её циклических изменений.

По сравнению с *Ulysses*, который летал в широком диапазоне гелиорadiusов и гелиоширот, Земля, можно сказать, находилась в неподвижности. Поэтому вариации КЛ, наблюдавшиеся на Земле нейтронными мониторами, использовались для разделения пространственных и временных вариаций в данных *Ulysses* [Белов и др., 2003; Belov et al., 2003]. Одним из результатов такой работы стало распределение высокоэнергичных КЛ во внутренней гелиосфере в периоды низкой (1994–1996) и высокой (1998–2001) солнечной активности (рис. 3). В минимуме активности плотность КЛ сильно зависит от гелиодолготы и почти не зависит от расстояния до Солнца. В максимуме, напротив, широтная зависимость уменьшается, а радиальная становится главной.

Анализ данных высокоэнергичных каналов *Ulysses* вместе с данными наземной сети нейтронных мониторов (НМН) показал, что область усиленной модуляции КЛ, которая в минимуме солнечной активности занимает только узкую полосу широт вблизи гелиоэкватора, быстро расширяется и в годы максимума солнечной активности охватывает всю гелиосферу (см. рис. 3). По-видимому, это происходит вместе с увеличением наклона гелиосферного токового слоя и вследствие этого. На протяжении 3,5 лет (с начала 1998 г. до середины 2001 г.) измерения КЕТ/*Ulysses* на фазе роста солнечной активности хорошо согласуются с предположением о сферически симметричном распределении высокоэнергичных КЛ во внутренней гелиосфере с большим радиальным градиентом $\sim 3,7\%/a.e.$ для протонов >2 ГэВ и $\sim 2,4\%/a.e.$ для гелия (>2 ГэВ/н). Интересно отметить одно из следствий глобальной перестройки гелиосферы, в которой участвуют космические лучи. Величина 11-летней вариации КЛ вблизи полюсов оказывается существенно больше, чем вблизи гелиоэкватора, и, в частности, на Земле. В данных *Ulysses* есть указания на то, что во второй половине 2001 г. и в 2002 г. пространственное распределение КЛ во внутренней гелиосфере стало вновь перестраиваться, потеряв простую сферически симметричную форму и, возможно, частично восстановив положительный широтный градиент на высоких гелиоширотах.

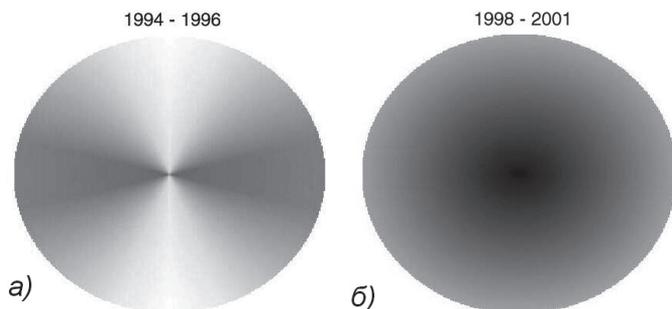


Рис. 3. Рассчитанное для минимума (а) и максимума (б) солнечной активности распределение протонов с энергией >2 ГэВ/нуклон в сфере радиусом 5 а.е. вокруг Солнца по данным *Ulysses* и сети НМ

3. АНИЗОТРОПИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ И ИХ СВЯЗЬ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ В ГЕЛИОСФЕРЕ)

Форма, направление, величина и энергетический спектр анизотропии галактических космических лучей связаны с конкретными структурами в гелиомагнитосфере, с напряжённостью межпланетного магнитного поля (МПП), а также со скоростью солнечного ветра. Структурные особенности и процессы в солнечном ветре в широком пространственном ($10^9 \dots 10^{14}$ см) и временном ($10^3 \dots 10^8$ с) диапазонах отражаются в наблюдаемой на Земле анизотропии КЛ и могут изучаться с её помощью. В отличие от мюонных телескопов, нейтронные мониторы не дают информации о направлении прихода регистрируемых частиц и один монитор анизотропию КЛ непосредственно не измеряет. Но мировая сеть НМ — это прекрасный инструмент для измерения анизотропии, и большая часть наших знаний об анизотропии КЛ получена с помощью сети нейтронных мониторов. Методика определения анизотропии прошла путь от простейшего расчёта суточных вариаций до сложнейшего метода глобальной съёмки, вариант которого был разработан в ИЗМИРАН и используется сейчас для выделения нулевой (плотность КЛ — изотропная часть потока КЛ), первой и второй гармоник анизотропии [Belov et al., 2005].

На рис. 4 представлена «зацепленная» векторная диаграмма из векторов экваториальной компоненты первой гармоники анизотропии КЛ (или солнечно-суточной анизотропии), полученных за каждый час в течение 54 последних лет. Таким образом, в рис. 4 объединены около 500 000 векторов. Долгопериодное поведение анизотропии КЛ весьма хорошо отражает регулярную солнечную цикличность. Первое, что бросается в глаза — это солнечный (22-летний) магнитный цикл, который управляет фазой анизотропии. Это управление столь очевидно, что одних наблюдений космических лучей было бы достаточно, чтобы догадаться о существовании магнитного цикла.

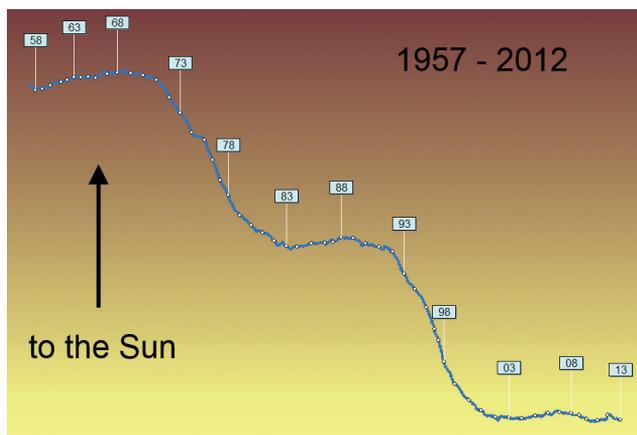


Рис. 4. Векторная диаграмма солнечно-суточной анизотропии КЛ за 1957–2013 гг., полученная по часовым данным нейтронных мониторов после обработки методом глобальной съёмки

В отличие от фазы, амплитуда анизотропии подчиняется 11-летнему циклу солнечной активности [Крымский и др., 1981; Belov, 2000]. Эта картина содержит ценные сведения о долговременных изменениях структуры гелиомагнитосферы и пространственного распределения галактических КЛ. Эта регулярная картина драматически изменяется, если перейти к меньшим временным масштабам. Именно в данных нейтронных мониторов обнаружилось, что анизотропия галактических КЛ иногда (как правило, во время прихода к Земле больших межпланетных возмущений) существенно увеличивается, в отдельные часы достигая 10 % [Белов и др., 2009]. В эти периоды анизотропия КЛ претерпевает быстрые и значительные изменения, которые отражают структуру и динамику межпланетных возмущений. Таким образом, изменения анизотропии, определяемой по данным нейтронных мониторов — это история солнечного ветра, которая постоянно дополняется и распространяется и на периоды, когда прямых измерений солнечного ветра не было

4. НЕЙТРОННЫЕ МОНИТОРЫ И ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ

Форбуш-понижения (ФП) (другое название форбуш-эффекты) это, возможно, самые яркие и разнообразные явления в вариациях КЛ [Belov, 2009; Cane, 2000; Lockwood, 1971], обусловленные выбросами солнечного вещества (СМЕ) или высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Они были открыты Скоттом Форбушем (Scott Ellsworth Forbush, 1904–1984) в 1937 г. [Forbush, 1937], задолго до изобретения нейтронных мониторов, но именно нейтронные мониторы дали и продолжают давать основную часть сведений о форбуш-эффектах. В 1990-е гг. в отделе начала создаваться база данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, основанная на изменениях плотности и анизотропии КЛ, рассчитанных по данным мировой сети нейтронных мониторов за каждый час. К настоящему времени она включает в себя более 6500 событий за период 1957–2012 гг.

На рис. 5 показаны моменты только самых больших из них, которые обычно создаются выбросами солнечного вещества (СМЕ). В 19-20-м солнечных циклах СМЕ не могли наблюдаться, да и позднее их наблюдения были неполными. Однако форбуш-эффекты дают полную историю геоэффективных выбросов солнечного вещества. Другие особенности форбуш-эффектов: 1) изменения плотности и анизотропии КЛ во время ФП отражают структуру межпланетных возмущений (ударные волны, границы магнитных облаков и т. п.); 2) изменения в КЛ начинаются задолго до прихода возмущений солнечного ветра к Земле и могут быть их предвестником; 3) форбуш-эффекты, как правило, наблюдаются одновременно с геомагнитными и ионосферными возмущениями и их наблюдения могут использоваться для геомагнитных и ионосферных прогнозов; 4) частота и величина ФП отражает изменения солнечной активности и может использоваться для анализа и прогноза всплесков солнечной активности [Belov et al., 2007]. Всё это повышает ценность наблюдений форбуш-эффектов и данных нейтронных мониторов.

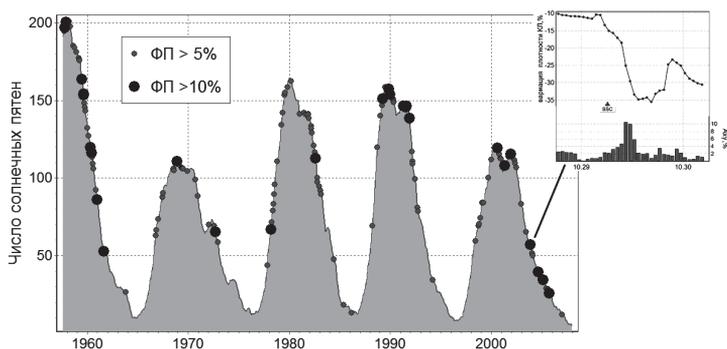


Рис. 5. Моменты больших форбуш-понижений в 1957–2007 г. на фоне изменений сглаженных чисел пятен. Показаны ФП с величиной >5 и $>10\%$ для вариаций плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ. Отдельно даны вариации плотности и амплитуды солнечно-суточной анизотропии КЛ (10 ГВ) во время самого большого в истории наблюдений форбуш-понижения 29 октября 2003 г.

Было проведено детальное исследование связи величины и других параметров форбуш-эффектов с гелиодолготой и эруптивными характеристиками их солнечных источников. Анализ событий в космических лучах, связанных с корональными выбросами вещества показал, что от центральных солнечных источников наблюдаются более глубокие форбуш-понижения, чем от периферийных, а восточные источники, в целом, эффективнее западных в понижении плотности космических лучей. Вместе с тем, форбуш-эффекты от западных источников анизотропнее, чем от восточных.

5. ПРЕДВЕСТНИКИ ПРИХОДА К ЗЕМЛЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Поведение ГКЛ перед форбуш-эффектами было исследовано и может быть использовано в прикладном аспекте для предупреждения о начале магнитной бури. Галактические КЛ, взаимодействуя с транзитными возмущениями, распространяющимися от Солнца к Земле, приносят информацию о приближающемся возмущении задолго до его прихода. Наиболее выраженные эффекты в ГКЛ перед ФП следующие: 1) предвозрастание интенсивности КЛ, вызванное ускорением ГКЛ на фронте приближающегося возмущения; 2) предпонижение, обусловленное магнитной связью между Землёй и областью пониженной плотности за движущимся ударным фронтом. Эти эффекты анизотропны и зависят от гелиодолготы вспышки-источника, поэтому по-разному проявляются на разных станциях. Впервые признаки таких предвестников были отмечены ещё в 1959 г. [Blokh et al., 1959], но только недавно они стали интенсивно исследоваться [Nagashima et al., 1994]. В 1995 г. в отделе были выполнены исследования с использованием метода кольца станций и метода глобальной съёмки, которые показали, что такие предвестники наблюдаются во многих событиях и могут надёжно исследоваться по текущим данным нейтронных мониторов [Belov et al., 1995].

На рис. 6 приведён один из ярких примеров появления предвестника в сентябрьском событии 1992 г. Здесь представлена временная развёртка распределения вариаций КЛ на каждой по асимптотическим направлениям с 6 по 12 сентября 1992 г. Жёлтые и красные кружки соответствуют положительной и отрицательной вариации КЛ на каждой станции за каждый час, причём, размер кружка пропорционален величине вариации. Вертикальная линия обозначает момент прихода к Земле ударной волны. Обычно, в спокойном состоянии гелиосферы, такое распределение можно описать простой синусоидой. На рис. 6 видно, что в данном случае за несколько часов (~20) до прихода ударной волны наблюдается существенная перестройка в распределении вариаций: значительное понижение интенсивности КЛ регистрируют станции с асимптотическими направлениями около 135° , т. е. вдоль силовой линии ММП, в то время как на остальных станциях наблюдается повышенная интенсивность.

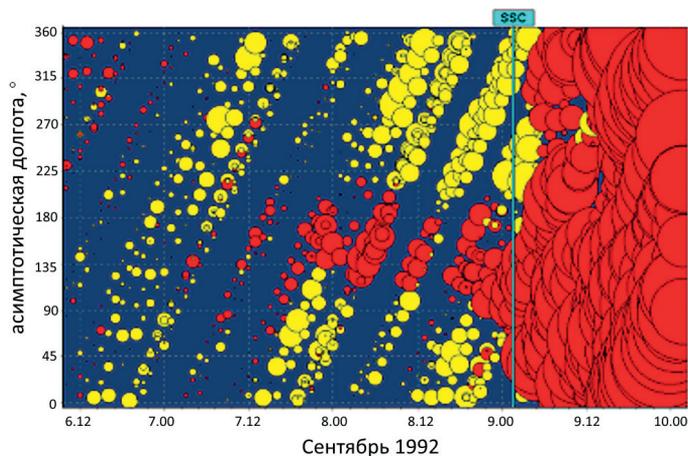


Рис. 6. Распределение вариаций КЛ по асимптотическим долготам различных станций (в данном случае — по 45 станциям) в событии 6–10 сентября 1992 г. Красные кружки означают понижение, жёлтые — возрастание интенсивности КЛ. Вертикальная линия соответствует приходу ударной волны

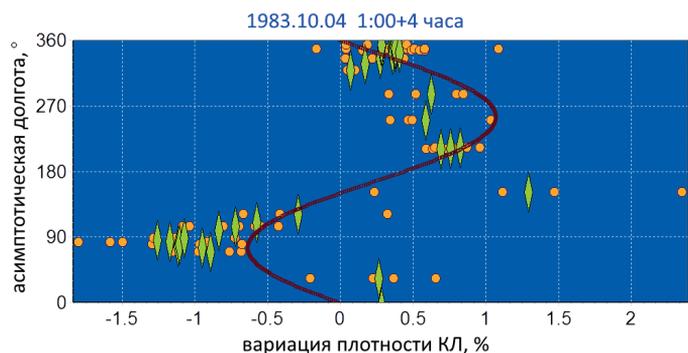


Рис. 7. Асимптотическое распределение вариаций КЛ за 1 ч (оранжевые кружки) и за 5 ч (зелёные ромбы) до прихода ударной волны в событии 10 апреля 1983 г.

Эффект предвестника очень анизотропен, поэтому покрытие небесной сферы в асимптотических направлениях используемых станций должно быть как можно полнее, иначе возрастает риск потери значительной части предвестника.

Метод кольца станций, разработанный в отделе, основанный на использовании данных сети НМ, учитывает сдвиг эффективного положения станции из-за магнитного поля Земли относительно её географической долготы с помощью коэффициентов связи [Clem, Dorman, 2000] при плоском жест костном спектре до 100 ГВ верхнего предела. Этот метод является хорошим дополнением к методу глобальной съёмки, но имеет и ряд преимуществ. Например, он позволяет выделить отличное от синусоидального (негармоническое) распределение вариаций КЛ во время возникновения предвестника, когда возрастание интенсивности резко сменяется понижением вблизи магнитной силовой линии. Один из примеров такого распределения представлен на рис. 7 для события 10 апреля 1983 г. за пять часов и за один час до прихода ударной волны. Чёрным цветом обозначена синусоида, наилучшим образом проведённая через данные [Parailiou et al., 2013]. Можно видеть, какие большие отклонения, далеко выходящие за пределы ошибок, наблюдаются в районе максимума и минимума синусоиды. Такое специфическое распределение наблюдается почти в каждом предвестнике и может служить надёжным подтверждением его существования

В настоящее время уже во многих исследованиях (в том числе зарубежных) показано, что предповышения и предпонижения интенсивности КЛ, которые обычно опережают форбуш-понижение, могут служить инструментом для изучения эффектов космической погоды. Использование метода «кольца станций» для построения асимптотического долготного распределения вариаций КЛ даёт явные признаки предвестников почти в 60 % случаев. Иногда размеры предвестника настолько велики, а распределение вариаций КЛ перед приходом возмущения (ударной волны) настолько необычно, что этот предвестник может служить для предсказания значительного возмущения, приближающегося к Земле, даже в отсутствие других данных.

Создание базы данных нейтронных мониторов в реальном времени в рамках проекта ЕС FP7 “Real time neutron monitor database with short time resolution”, в котором ИЗМИРАН принимал самое непосредственное участие, позволяет использовать часовые данные многих станций в реальном времени для построения асимптотического долготного распределения КЛ в любой момент времени. Это приложение реализовано в ИЗМИРАН и размещено на сайте <http://cr0.izmiran.ru/PrecurcorMonitoring/index.htm>.

Основы ультрафиолетовой/магнитной диагностики геоэффективности нерекуррентных источников геомагнитных бурь и форбуш-понижений

Одной из основных и наиболее важных задач солнечно-земной физики и прогнозирования космической погоды является диагностика геоэффективности корональных выбросов массы (CMEs/ICMEs — coronal mass ejections).

tions / interplanetary CMEs), т.е. заблаговременная оценка их способности вызывать нерекуррентные геомагнитные бури (ГМБ) и форбуш-понижения. Существующие алгоритмы такой диагностики опираются, в основном, на данные о скорости, угловых размерах и форме CMEs в картинной плоскости коронографа.

Мы предложили и реализовали принципиально новый подход к ранней диагностике геоэффективности солнечных эрупций. В качестве основного исходного параметра взят сравнительно легко измеряемый количественный параметр, непосредственно характеризующий мощность самой эрупции — суммарный магнитный поток диммингов и постэруптивных (ПЭ) аркад продольного поля на уровне фотосферы (Φ): $\Phi = \Phi_{dim} + \Phi_{arc}$.

Димминги и аркады связаны, прежде всего, с перестройками локальных магнитных полей в атмосфере Солнца, и в целом, визуализируют крупномасштабные структуры, вовлечённые в процесс эрупции CMEs, следовательно, их количественные параметры (например, магнитные потоки) могут быть полезными для ранних оценок геоэффективности соответствующих ICMEs.

Чтобы оценить информативность суммарного магнитного потока диммингов и аркад Φ , анализировалась его взаимосвязь с величиной форбуш-понижения (A_F), поскольку плотность КЛ не зависит от знака B_z -компоненты магнитного поля в ICMEs, в отличие от величины ГМБ.

Анализ событий 23-го цикла, включающих корональные выбросы из центральной зоны и большие геомагнитные бури, показал, что между эруптивным магнитным потоком и величиной форбуш-понижений A_F существует достаточно тесная связь, близкая к линейной (коэффициент корреляции $r \approx 0,86$) [Chertok et al., 2013].

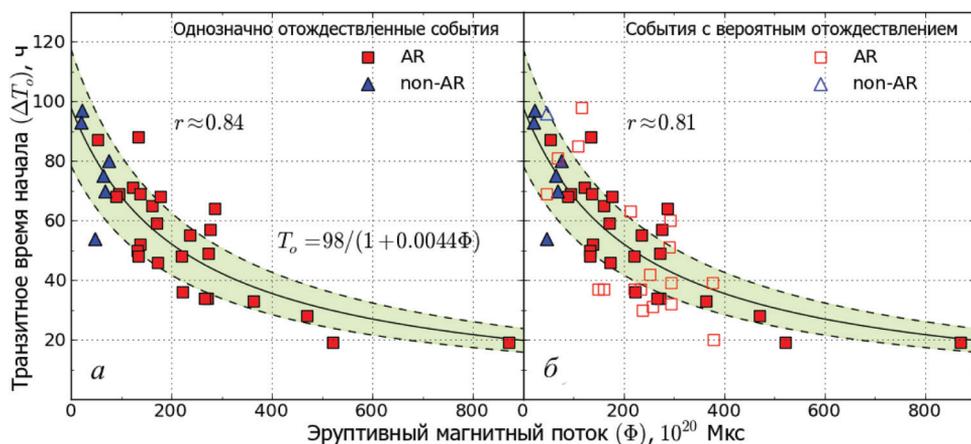


Рис. 8. Зависимость транзитного времени начала ΔT_0 возмущения от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад Φ : *а* — однозначно отождествлённые события с одним источником (группа $S1$), включающие в себя как эрупции в активной области (АО) (■), так и вне АО (▲); *б* — все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не отождествлённые однозначно с солнечным источником (группы $S2$ и $M2$)

Исследовалась также связь суммарного магнитного потока диммингов и аркад с транзитными временами: временем начала возмущения (ΔT_o) и временем пика ГМБ (ΔT_p). Естественно, что оба этих времени зависят от разных причин. Тем не менее, используя эруптивный магнитный поток Φ , можно оценить транзитные времена и, следовательно, транзитную скорость ICMEs, что важно для прогнозирования космической погоды. На рис. 8 приведена зависимость транзитного времени начала возмущения от эруптивного магнитного потока диммингов и аркад.

На рис. 8 видно, что чем больше суммарный магнитный поток (т.е. чем мощнее эрупция), тем быстрее возмущение проходит расстояние от Солнца до Земли и тем быстрее начинаются ГМБ и ФП. В событиях со слабым эруптивным магнитным потоком $\Phi < 100$ (в единицах 1020 Мкс) возмущения на Земле начинаются через $\Delta T_o \approx 70...95$ ч. Самым мощным эрупциям с $\Phi = 500...900$ (1020 Мкс) соответствует время начала $\Delta T_o \approx 20$ ч, при котором транзитная скорость ICME достигает ~ 2100 км/с.

Полученные результаты показывают, что параметры межпланетных возмущений, вызванные CMEs/ICMEs, в значительной степени определяются энергетикой и пространственными размерами солнечных эрупций, несмотря на множество других факторов, влияющих на распространение корональных выбросов от Солнца до Земли.

Важно отметить, что уже в момент, близкий ко времени солнечной вспышки, используя изображения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне и магнитограммы Солнца, можно оценить магнитный поток диммингов и аркад, а затем и ожидаемую интенсивность ГМБ, амплитуду ФП, а также величины транзитного времени.

7. ОСОБЕННОСТИ 19-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

К интересным результатам привело изучение особенностей крупных межпланетных возмущений в 19-м цикле солнечной активности по данным о форбуш-эффектах и геомагнитной активности.

В 19-м цикле наблюдалась аномально высокая солнечная активность, но возможности её наблюдения были ограничены: доступны были только наземные наблюдения космических лучей, наряду с геомагнитной активностью. Сопоставление событий в космических лучах с солнечной и геомагнитной активностью показало, что количество и мощность магнитных бурь в 19-м цикле соответствует аномально высокому числу солнечных пятен. Однако в этом цикле существует определённый дефицит больших форбуш-понижений. Если расположить все события, произошедшие за последние 55 лет, в порядке убывания величины ФП, то в первом десятке событий окажется только один представитель из 19-го цикла с $A_F \approx 16,1\%$ (12.11.1960), причём на последнем, десятом месте (рис. 9).

19-й цикл отличается от других циклов как количеством пятен, так и количеством исключительно больших (extreme) магнитных бурь (в 19-м цикле их было семь, в других — не более трёх). Подобная картина и с магнитными бурями следующей по мощности категории (severe). Естественно было бы ожидать, что-то похожее и от форбуш-понижений, но это не так.

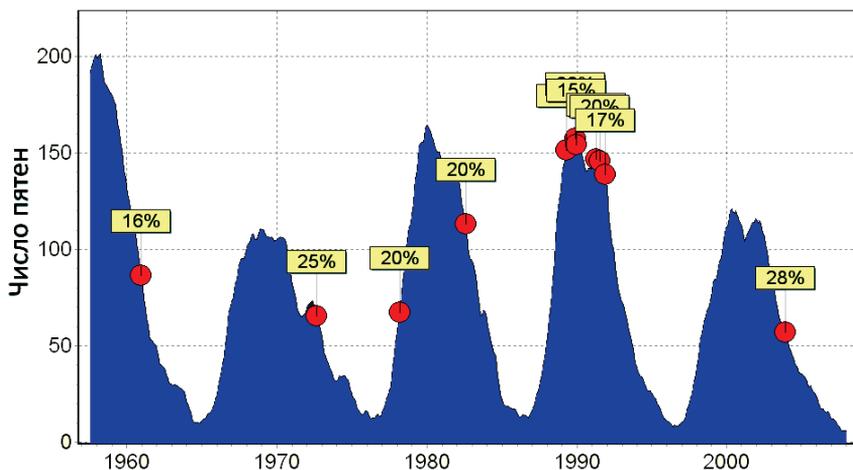


Рис. 9. Число солнечных пятен и моменты самых больших форбуш-эффектов в 19–23-м солнечных циклах

Количество ФП с величиной $A_F > 5\%$ в 19-м цикле почти такое же, как в 21-м и 22-м, и явно меньше, чем в 23-м цикле — и это притом, что в 19-м цикле было почти в два раза больше магнитных бурь с Kp -индексом ≥ 8 , чем в других циклах. Что касается ФП с $A_F > 10\%$, то здесь 19-й цикл выделяется, но не столь явно, как для ГМБ.

Если же говорить о гигантских ФП в КЛ (с $A_F > 15\%$), то в этой выборке выделяется вовсе не 19-й, а 22-й цикл (см. рис. 9). Одно из возможных объяснений дефицита больших форбуш-понижений, состоит в том, что наиболее мощные корональные выбросы массы 19-го цикла имели, в целом, меньший размер, чем самые большие выбросы более позднего периода [Abunin et al., 2013].

Найдено усреднённое поведение плотности и векторной анизотропии космических лучей во время прохождения всех межпланетных ударных волн в 1965–2005 гг. Показано, что поведение плотности и, особенно, анизотропии КЛ сильно зависит от гелиодолготы солнечных источников межпланетных возмущений и для западных источников начинает меняться задолго до прихода ударной волны.

Из всех форбуш-эффектов 1977–2000 гг. выделена группа событий, в которых большие вариации КЛ наблюдались на фоне относительно слабых возмущений межпланетного магнитного поля. Во всех отобранных событиях главную роль играли выбросы солнечного вещества, связанные со вспышками, и в списке источников эффективных возмущений оказалось втрое больше вспышек с восточными координатами, чем с западными. Главный вывод об эффективности межпланетных возмущений, — они намного мощнее, чем выглядят, а их особо высокая модулирующая способность связана с тем, что область высокой модуляции КЛ существенно шире области большой напряжённости ММП и сдвинута по отношению к ней. В этих случаях наблюдения космических лучей дают лучшее представление об истинной мощности возмущения, чем околосемные измерения солнечного ветра.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Как и на первом этапе существования отдела, продолжалось постоянное исследование солнечных КЛ и, в основном, решались проблемы, поставленные ещё в 1980-е гг. Были проанализированы наиболее мощные солнечно-протонные события 22-го и 23-го циклов солнечной активности в различных точках гелиосферы на борту КА *Ulysses* и вблизи Земли на спутнике *GOES* и *ACE*. Этот анализ показал, что Солнце представляет собой протяжённый в пространстве и во времени источник космических лучей, намного более сложный, чем представлялось ранее. Напротив, усреднённый процесс распространения частиц в гелиосфере до КА *Ulysses* — продольная и поперечная диффузия — является стабильным и практически не меняется от события к событию первые двое-трое суток после инъекции протонов в межпланетное пространство, пока возмущения солнечного ветра не достигают КА [Struminsky, Heber, 2005].

28 октября 2003 г. нейтронный монитор Цумеб (*Tsumeb neutron monitor (NM)*) зафиксировал два возрастания, которые были вызваны приходом прямых солнечных нейтронов (аналогично событию 4 июня 1991 г.). Для моделирования была использована функция инъекции нейтронов пропорциональная темпу счёта детектора *ACS SPI* для первого эпизода, возрастающая и спадающая экспоненты с характерным временем 200 с для второго эпизода.

20 января 2005 г. временной профиль интенсивности протонов в канале 80...165 МэВ имел два максимума. Наблюдалось изменение спектра протонов, которое можно интерпретировать как дополнительное ускорение на Солнце. Наилучшее согласие между измеренными и рассчитанными интенсивностями получается в модели с длительной инъекцией протонов в межпланетное пространство с двумя максимумами [Struminsky, 2005].

Проведён сравнительный анализ наземных возрастаний в октябре-ноябре 2003 г. (*GLE65*, *GLE66*, и *GLE67*), январе 2005 г. (*GLE69*), декабре 2006 г. (*GLE70*), а также в мае 2013 г. по данным мировой сети станций космических лучей (~40 станций), получены оценки потоков и спектров по вновь разработанной методике [Белов и др., 2010; Plainaki et al., 2010].

По данным 14 нейтронных мониторов, работавших в 1956 г., создана модель поведения солнечных космических лучей в исключительно большом наземном возрастании 23 февраля 1956 г. [Белов и др., 2005]. Работавших в то время немногочисленных и не отвечающих современным требованиям нейтронных детекторов оказалось достаточно, чтобы получить основные характеристики наземного протонного возрастания и их динамику. Получены и проанализированы изменения характеристик энергетического спектра космических лучей и их анизотропии, дифференциальных и интегральных потоков. Показано, что наиболее выдающейся особенностью этого возрастания был узкий, шириной 30...40°, и чрезвычайно интенсивный пучок ультрарелятивистских частиц, пришедший к Земле в начале события. Несколько нейтронных мониторов, попавшие под этот пучок, зарегистрировали возрастание в тысячи процентов. Однако из-за кратковременности и малой ширины его влияние на плотность солнечных

частиц или на их флюэнс было не так велико. Оценка интегрального потока частиц >100 МэВ ставит изучаемое событие выше всех последующих, но при этом оно уже не выпадает из общего распределения [Белов и др., 2005].

9. ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Барометрический эффект нейтронной и мюонной компонент

Несмотря на то, что теория барометрических эффектов была хорошо разработана ещё в начале работы мировой сети [Дорман, 1957], и определять коэффициенты для коррекции данных на атмосферное поглощение не составляло большого труда, тем не менее, в процессе непрерывного мониторинга КЛ выяснилось, что барометрический коэффициент зависит от цикла солнечной активности, от величины наблюдаемых вариаций КЛ, да и просто не всегда корректно оценивался на некоторых станциях. Кроме того, в последнее время появились (и появляются) новые станции КЛ, для которых необходимо производить оценки барометрических коэффициентов. В связи с этим в отделе (совместно с греческой группой КЛ) было проведено усовершенствование программы расчёта барометрического коэффициента с учётом особенностей различных станций [Kobelev et al., 2011]. Была также создана версия расчёта барометрического коэффициента в реальном времени, которая позволяет производить контроль изменения этих коэффициентов, а также следить за качеством данных на станции (Online calculation of NM barometric coefficient, 2012, <http://cosray.phys.uoa.gr/>) [Paschalis et al., 2013] (рис. 10).

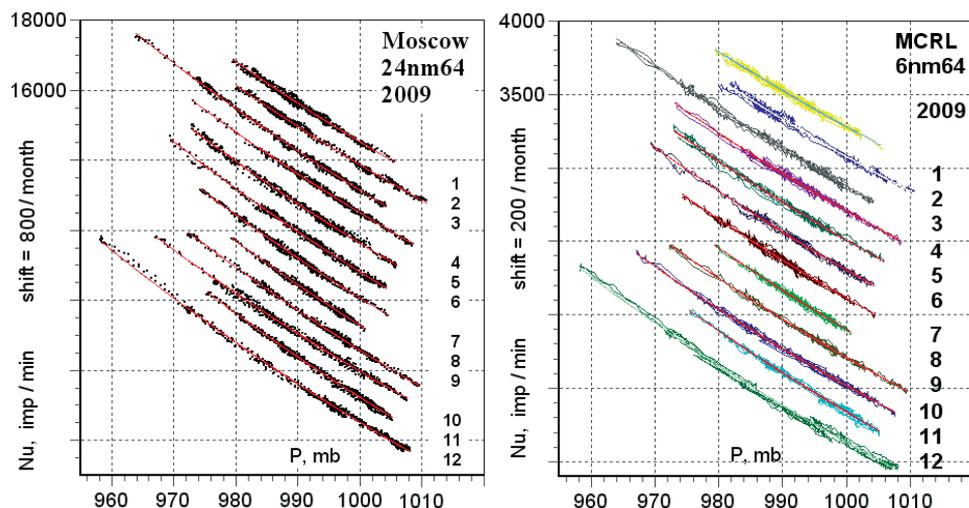


Рис. 10. Барометрические коэффициенты для станции MCRL (Москва, походный вариант) и Moscow — основной монитор, 24 счётчика. Коэффициенты посчитаны для каждого месяца 2009 (спокойного) года

Предложенный метод позволяет вполне успешно оценивать долговременные изменения в барометрических коэффициентах различных станций мировой сети, как это было показано для 22-го и 23-го циклов СА. Важно, что с помощью этого метода каждая станция может адаптировать свой барометрический коэффициент к реальным условиям при введении поправок на атмосферное давление в текущие данные.

Согласно теории принято считать, что барометрический эффект мюонной компоненты столь больших энергий (~ 220 ГэВ) незначителен, так как его абсолютное значение уменьшается с ростом пороговой энергии регистрируемых частиц [Дорман, 1972]. Однако в ряде работ барометрический коэффициент, полученный с помощью линейной регрессии на установках, регистрирующих мюонную компоненту КЛ с энергией порядка 100 ГэВ, оказался $b = (-0,047 \pm 0,0016) \%$ /мбар, в то время как теоретически рассчитанное значение составляло $-0,007 \%$ /мбар. Напомним, что для одиночных мюонов на поверхности Земли ($E_{th} \approx 0,4$ ГэВ) барометрический коэффициент примерно равен $b \approx -0,2 \%$ /мбар. И, согласно теории метеорологических эффектов [Дорман, 1972], абсолютная величина барометрического коэффициента должна уменьшаться с ростом энергии измеряемых частиц. Экспериментальные значения барометрических коэффициентов, полученные для баксанского универсального скинтилляционного телескопа (БУСТ) превосходят теоретические на порядок и более, что подтверждалось некоторыми ранними работами. При исследовании в ИЗМИРАН этого неожиданного результата было показано, что рост абсолютных значений барометрических коэффициентов можно объяснить тем, что до энергий вторичных частиц около 100 ГэВ наблюдаются в основном одиночные мюоны, для более высоких энергий всё более существенен вклад групп мюонов широких атмосферных ливней. Таким образом, барометрический эффект мюонной компоненты, наблюдаемый по данным БУСТ, можно объяснить тем, что для вторичных частиц с энергий > 100 ГэВ становится более существенным вклад групп мюонов широких атмосферных ливней, который увеличивается с ростом энергии регистрируемых частиц [Berkova et al., 2014].

Температурный эффект мюонной компоненты

Широкое использование данных мюонных детекторов ограничено наличием большого температурного эффекта этой компоненты во вторичном космическом излучении, который обусловлен распадом пионов и мюонов и их взаимодействием с ядрами атмосферы. Чтобы ввести температурные поправки, необходимы данные регулярного аэрологического зондирования атмосферы вблизи положения детектора. Но очень часто такие данные отсутствуют вообще и их ретроспективное восстановление невозможно, что сказывается на возможности использования данных телескопов. В отделе проведена большая работа, доказавшая, что более эффективно использовать результаты глобальных атмосферных моделей, которые обеспечивают получение температурных профилей атмосферы в любом месте и в любое время. Такой подход был реализован в ряде наших работ (например,

[Berkova et al., 2012]). Использование моделей позволяет также вводить температурные поправки в реальном времени.

9. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Постоянное изучение различных видов вариаций КЛ и их связи с деятельностью Солнца и состоянием межпланетной среды привело к разработке некоторых прикладных аспектов. Основной ряд приложений был создан в 2007–2009 гг. при участии отдела в международном проекте FP7 «Создание базы данных нейтронных мониторов в реальном времени с высоким разрешением» (Real Time neutron monitor Data Base with High resolution — NMDB), где ИЗМИРАН выполнял ведущую роль в разработке приложений (Applications) (www.nmdb.eu).

Программа АЛЕРТ — генерация сигнала о начале большого протонного возрастания солнечных космических лучей на Земле для оповещения о возможной радиационной опасности во время больших солнечных вспышек. Принцип, заложенный в этой методике, основан на разности времени прихода релятивистских КЛ и частиц малых энергий (задержка в максимумах потоков составляет часы, рис. 11), что даёт возможность по профилю эффекта в релятивистских частицах оценить спектр приходящих частиц, а также возможные профили и интенсивность малоэнергичных частиц, которых на много порядков больше, и поэтому они наиболее радиационно опасны. Эта программа работает в реальном времени, используя минутные данные сети НМ из базы данных нейтронных мониторов в реальном времени (НМБД — NMDB): (<http://www.nmdb.eu/?q=node/19>).

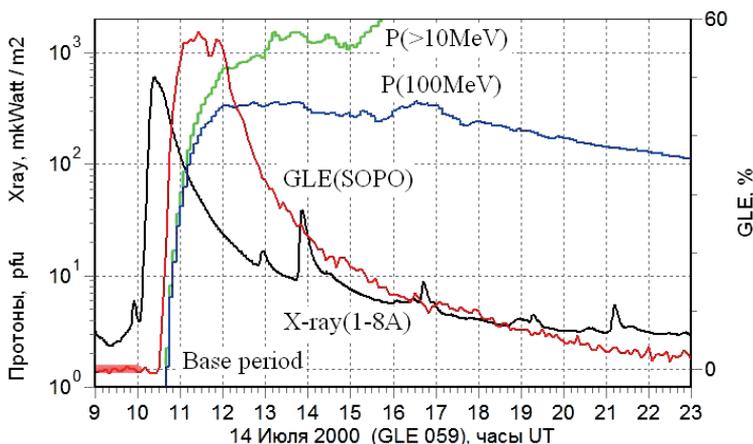


Рис. 11. Профили интенсивности солнечных КЛ различных энергий: красная линия — наземное возрастание на ст. Южный Полюс; зелёная и синяя — интенсивность 10- и 100-мегаэлектронвольтных частиц, зарегистрированная на спутнике GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite); чёрная линия — излучение в мягком рентгене в событии 14 июля 2000 г. (GLE 059)

Приложение «Анизотропия» даёт распределение вариаций КЛ по асимптотическим долготам в любой запрашиваемый момент времени, включая текущий. Этим обеспечивается возможность мониторинга предвестников магнитных бурь и исследование как спорадических, так и рекуррентных солнечно-земных событий. Целью использования этого приложения в перспективе является генерация сигнала, предупреждающего о приближении геомагнитной бури за несколько часов до её начала.

Приложение «Спектр». Ежедневно проводятся расчёты жёсткостного спектра галактических КЛ по среднесуточным и среднемесячным данным. Результаты публикуются в НМДБ (<http://www2.nmdb.eu/?q=node/19>) и используются для оценок радиационных доз, обусловленных ГКЛ. Алгоритм и полное описание метода находятся в библиотеке НМДБ (<http://www.nmdb.eu/?q=node/274>).

Прогноз космической погоды. Непрерывный мониторинг космических лучей наземными детекторами даёт возможность определить основные характеристики релятивистских космических лучей не ретроспективно, а в режиме реального времени. Эти характеристики можно столь же оперативно анализировать совместно с другими регулярно обновляемыми в Интернет рядами солнечных, межпланетных и геофизических измерений. Таким образом, мы можем использовать наземные наблюдения не только в обычных научных исследованиях, но и для решения повседневных практических задач космической погоды. Около 15 лет в ИЗМИРАН работает Центр прогнозов космической погоды, который начинал свою работу и был создан при самом непосредственном участии сотрудников Отдела. И до сих пор основная прогностическая работа ведётся сотрудниками отдела космических лучей. Используя обширную информацию о состоянии Солнца и солнечного ветра, а также собственные разработанные модели, Центр даёт оценки геомагнитной активности за день, два, три и за неделю вперёд, и рассылает эти данные в более чем 50 адресов.

Оценка влияния космической погоды на космические аппараты. Был проведён статистический анализ влияния факторов космической погоды на работу спутников по отказам на ~300 космических аппаратах с различными орбитами за период 1971–1994 гг. [Dorman et al., 2005]. На рис. 12 дано схематическое представление результатов этого анализа. Впервые в анализ были включены данные по 49 спутникам серии «Космос». Кроме данных о спутниковых аномалиях к исследованию привлекался большой набор суточных и часовых значений параметров космической погоды. Статистический анализ, проведённый для более чем 6000 отказов, позволил подтвердить тесную связь спутниковых аномалий с геофизической обстановкой и получить количественные характеристики связей частоты отказов с факторами космической погоды и типами спутниковых орбит. В частности, очень интенсивные потоки солнечных протонов (>1000 pfu с энергией >10 МэВ) вызывают почти 20-кратное возрастание числа отказов на высоких полярных орбитах и гораздо менее влияют на геостационарные и низкие полярные орбиты.

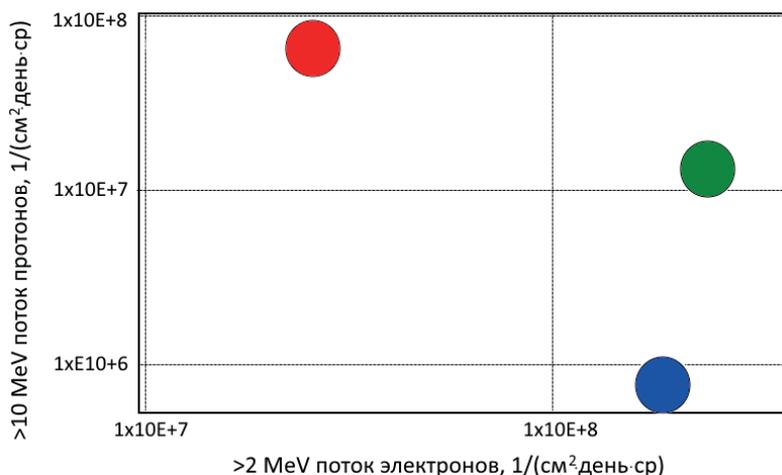


Рис. 12. Средние потоки протонов (>10 МэВ) и электронов (>2 МэВ) в аномальные дни, представляющие угрозу для спутников на различных орбитах. Красный цвет — высокоширотные орбиты с высоким наклоном; зелёный — высокоширотные орбиты с малым наклоном (геостационарные спутники); синий — низкоширотные орбиты с высоким наклоном

Повышенные потоки релятивистских (>2 МэВ) электронов увеличивают число отказов на геостационарных и на низкоорбитальных полярных спутниках, но практически не сказываются на высоких полярных орбитах.

Снег. Для некоторых станций, особенно приполярных и горных среднеширотных, снег является большой проблемой, поскольку вследствие высокой влажности он эффективно накапливается над детектором и вокруг него. Из-за труднодоступности большинства таких станций удалить снег механически не представляется возможным. Данные мониторинга, сильно искажённые переменным слоем снега, не пригодны для изучения многих типов вариаций, поэтому возникла настоятельная необходимость в разработке методики исправления данных НМ на эффект снега. Наша методика [Коротков и др., 2011] основана на сравнении вариаций КЛ на тестируемой и опорной станции, на которой нет снега и которую можно подбирать с помощью коэффициентов связи. Методика позволяет не только исключить эффект снега (с точностью 0,3...0,4 %) , но и оценить эффективную толщину снежного покрова. На основе этого результата была создана автономная система мониторинга толщины снежного покрова для оценки водных ресурсов в реальном времени в горах [Raquet et al., 2008]. Результаты такого непрерывного мониторинга (совместно с разработкой соответствующих моделей) позволяют предсказать динамику водных ресурсов, что важно для гидроэнергетики, сельского хозяйства, прогноза паводковых ситуаций, туризма.

Описываемая методика была апробирована для ряда станций космических лучей, на которых возможны скопления больших толщин снежного покрова, и на некоторых французских гидрометеорологических станциях, которые были созданы специально для решения таких задач.

10. СОЗДАНИЕ БАЗ ДАННЫХ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ ДЕТЕКТОРОВ

В период Международного геофизического года (МГГ) были созданы специальные международные центры данных (МЦД) для сбора данных и обмена ими: МЦД-А в США, МЦД-Б2 в России и МЦД-С в Японии. Они существуют до сих пор, но скорость обмена данными (большая задержка в поступлении данных), форма хранения и доступ к ним не могут обеспечить оперативный анализ и диагностику солнечно-земных связей на современном уровне. Развитие новых систем регистрации создало предпосылки для организации прямого доступа к данным с высоким временным разрешением на отдельных мониторах. Московская станция КЛ была первой, представившей в 1997 г. данные своего НМ в режиме *on-line*. Новая система сбора данных НМ была разработана в ИЗМИРАН и установлена на ряде российских станций КЛ.

С модернизацией сети НМ и развитием новых методов неоднократно возникали попытки создания баз данных в реальном времени для конкретных задач, с возможностью исследования отдельных ретроспективных периодов. Самая полная база данных с часовым разрешением и использованием всех работавших и работающих станций была создана в ИЗМИРАН по архивному образцу, с облегчённым доступом к данным, но с ограниченными возможностями (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>). В 2008 г. 12 разных стран, в том числе и РФ (ИЗМИРАН), скооперировались в рамках единой европейской программы, чтобы создать базу данных КЛ с высоким разрешением в реальном времени [Steigies et al., 2008] (рис. 13).

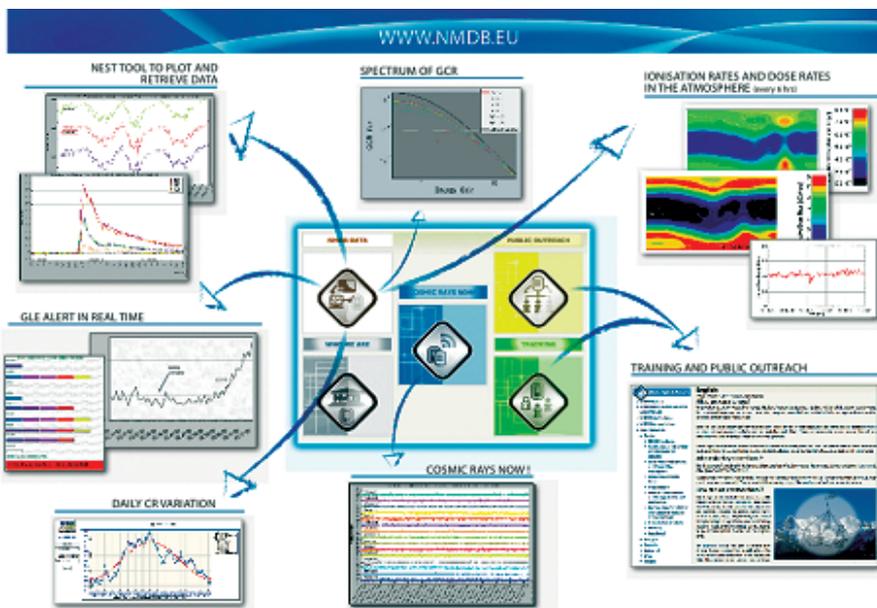


Рис. 13. Сайт НМДБ

Рабочая версия базы создана в рамках программы ЕС FP7 по проекту НМДБ (Real Time database for high resolution Neutron Monitor Measurements) и является результатом совместных усилий 12 европейских стран, включая Россию (ИЗМИРАН) (www.nmdb.eu).

Проект также представляет некоторые приложения по применению базы данных для фундаментальной науки и для задач космической погоды (выработка АЛЕРТ-сигнала по GLE, оценки радиационных доз, мониторинг предвестников межпланетных возмущений, приближающихся к Земле, и т. д.).

Создание баз данных, необходимых для проведения исследований вариаций космических лучей

Создана база данных по форбуш-эффектам и межпланетным возмущениям за полный период работы нейтронных мониторов (с 1957 г. по настоящее время). База является основным инструментом для всевозможных научных исследований, проводимых в отделе. Она содержит часовые характеристики космических лучей, полученные методом глобальной съёмки [Asipenka et al., 2009], по ~6500 событиям, а также сопутствующую информацию по параметрам межпланетной среды, и позволяет получать различные корреляционные связи. Расширен каталог всех транзиентных явлений в космических лучах (форбуш-эффектов), связанных с крупномасштабными возмущениями солнечного ветра, с 1957 по 2012 г. с обязательным включением межпланетных и сопутствующих геомагнитных характеристик, а также с привязкой к солнечным источникам (в тех случаях, когда её можно выполнить).

Создана база данных по отказам на ~300 космических аппаратах с различными орбитами за период 1971–1994 гг., послужившая инструментом для статистического анализа влияния окружающей среды на работу спутников. Впервые в анализ включены данные по 49 спутникам серии «Космос». Кроме данных о спутниковых аномалиях база содержит большой набор суточных и часовых значений параметров космической погоды.

Создана база данных рентгеновских вспышек и протонных событий. В неё включены данные рентгеновских измерений на спутниках серии GOES (1975–2004), данные протонных возрастаний, полученные на спутниках GOES и IMP-8 (Interplanetary Monitoring Platform), а также информация о наземных возрастаниях солнечных космических лучей. Разработано программное обеспечение, являющееся частью базы данных и существенно облегчающее исследования как солнечных вспышек, так и протонных событий и их взаимосвязи.

Проводится пополнение базы данных мюонных детекторов Global Muon Detector Network MDDB часового разрешения архивными данными. Проводится разработка скриптов для её обновления в реальном времени для телескопов Moscow-Cube, Якутск и Nagoya. База данных построена на основе программного обеспечения MySQL. Администрирование — с помощью веб-приложения с открытым кодом, написанное на языке PHP, PHPMyAdmin. Создана бета-версия приложения (Viewer mddb) для интер-

активного графического и цифрового представления данных. База данных будет включать данные восьми действующих мюонных детекторов. Кроме того, включены данные сейчас закрытых, но работавших продолжительное время (начиная с 1953 г.) подземных детекторов. Подготовлены данные вертикального температурного зондирования атмосферы для всех 22 пунктов расположения мюонных детекторов за весь период наблюдений.

При использовании такого большого количества станций (порядка 40 в каждом исследуемом периоде) за долгий период их работы, естественно, встаёт вопрос о качестве данных и стабильности работы каждой станции. Нами предложены независимые методы оценки долговременной эффективности нейтронных мониторов. Количественные оценки стабильности работы НМ получены для 90 детекторов, проработавших более одного цикла солнечной активности. Рассмотрены условия, определяющие долговременную стабильность детектора и причины, которые приводят к нарушению стабильности.

11. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

За годы существования отдела система регистрации нейтронной компоненты прошла путь от ламповых электронных схем и механических счётчиков через полуавтоматическую регистрацию с помощью телеграфных аппаратов — до современных систем сбора и обработки информации на микросхемах, с автоматической первичной обработкой данных и публикацией их в реальном времени на Интернет сайтах. В отделе было разработано несколько поколений регистраторов, последний вариант основан на модулях РСІ-1780, и ими оснащена сейчас почти вся российская сеть (и греческий НМ).

Со временем, а также из-за проблем в экономике и политике, некоторые станции в 1990-е гг. были законсервированы. Но в 2000-е гг. такие важные станции как Норильск (курируемый Иркутском) и антарктическая станция Мирный были полностью восстановлены и оснащены новыми регистраторами с помощью ИЗМИРАН.

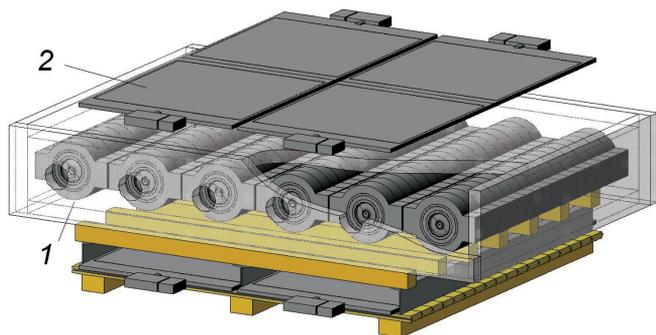


Рис. 14. Нейтронный монитор бпм64, совмещённый с мюонным телескопом на скintилляционных оптоволоконных модулях: 1 — счётчики нейтронного монитора (СНМ-15); 2 — оптоволоконные пластиковые скintиппаторы ИНЕР

Развитие эксперимента получило продолжение в разработке нового мюонного телескопа NewMoscow-ОПТО на больших пластических сцинтилляторах ИИЕР, совмещённого с нейтронным монитором бnm64 (рис. 14). Преимущество этих сцинтилляторов в том, что у них гораздо выше коэффициент сбора света, что позволяет использовать усилители с меньшим коэффициентом усиления и получать более стабильный детектор. Разработана и отлажена специализированная система мониторинга, анализа и ответной реакции MARS-10T (Cisco Security Monitoring, Analysis and Response System) для сбора данных мюонных телескопов. Система разработана под управлением операционной системы (ОС) Windows и начата разработка под управлением ОС Linux.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все годы существования отдела продолжается непрерывный мониторинг нейтронной и мюонной компонент космических лучей на станции Москва с проведением оперативной обработки минутных и часовых данных, оперативного анализа и представления этих данных в режиме реального времени в Интернет, а также их передачи в Международные центры данных C и B и сборник Solar Geophysical DATA для оперативной публикации. ИЗМИРАН был первой станцией в мире, осуществившей публикацию своих данных по регистрации космических лучей в реальном времени в Интернете. С 2008 г. минутные и часовые данные стандартного нейтронного мониторинга, а также походного варианта (MCRL — бnm64) поступают в международную базу данных НМДБ в реальном времени.

Проводится техническая помощь в модернизации Российской сети станций космических лучей. При нашем техническом содействии на станции космических лучей мыс Шмидта организована электронная передача данных на сервер ИЗМИРАН. Созданы три секции нейтронного монитора (по бnm64) для станции космических лучей Шпицберген. Продолжаются подготовительные работы по модернизации станций Новосибирск, Магадан, Тикси и Баксан, Иркутск-2000 и Иркутск-3000, Норильск. Это всё станции с уникальным расположением по долготам, без которых невозможно проводить полноценные исследования в описанных выше направлениях. Мы всё больше убеждаемся в необходимости проведения долговременного мониторинга космических лучей. ИЗМИРАН не растерял свою сеть и основные кадры в трудные периоды и продолжает всеми силами (последними) поддерживать способность к проведению дальнейших работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [Белов, 2010] *Белов А. В.* Российская сеть нейтронных мониторов: история создания, современное состояние, перспективы // С. Н. Вернов. М.: Изд-во МГУ, 2010. 358 с. С. 93–114.
- [Белов и др., 1989] *Белов А. В., Блох Я. Л., Гущина Р. Т., Дорман И. В., Дорман Л. И., Ерошенко Е. А.* и др. Галактические и солнечные космические лучи: вариации

- и происхождение // Электромагнитные. и плазменные процессы от Солнца до Земли / Под ред. В. В. Мигулина. М.: Наука, 1989. С. 49–62.
- [Белов и др., 2003] *Белов А. В., Ерошенко Е. А., Мюллер-Меллин Р., Хибер Б., Янке В. Г., Кунов Х.* Широтные и радиальные вариации протонов и альфа-частиц с энергией >2 GeV/n в южной гелиосфере в максимуме солнечной активности: наблюдения на КА Ulysses и сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. 2003. Т. 43. № 4. С. 1–9.
- [Белов и др., 2005] *Белов А. В., Ерошенко Е. А., Янке В. Г.* Исключительно большое наземное возрастание солнечных космических лучей 23 февраля 1956 г. по данным нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 3. С. 359–372.
- [Белов и др., 2009] *Белов А., Асипенка А., Дрынъ Е., Ерошенко Е., Крякунова О., Оленева В., Янке В.* Поведение векторной анизотропии космических лучей вблизи межпланетных ударных волн // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 348–350.
- [Белов и др., 2010] *Белов А. В., Ерошенко Е. А., Крякунова О. Н., Курт В. Г., Янке В. Г.* Наземные возрастания солнечных космических лучей в трёх последних солнечных циклах // Геомагнетизм и аэрномия. 2010. Т. 50. № 1. С. 23–36.
- [Дорман, 1957] *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей. М.: Гостехиздат, 1957.
- [Дорман, 1972] *Дорман Л. И.* Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.
- [Дорман, Фейнберг, 1956] *Дорман Л. И., Фейнберг Е. Л.* Вариации космических лучей // Успехи физ. наук (УФН). 1956. Т. 59. Вып. 2. С. 189–228.
- [Коротков и др., 2011] *Коротков В. К., Беркова М. Д., Белов А. В., Ерошенко Е. А., Янке В. Г.* Эффект снега в вариациях космических лучей и методы его учёта // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 2. С. 250–256.
- [Крымский и др., 1981] *Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Кривошапкин П. А.* и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1981. 224 с.
- [Abunin et al., 2013] *Abunin A., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V.* Forbush-decreases in 19th solar cycle // J. Physics: Conference Series. 23rd ECRS. 2013. V. 409. 012165. doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012165, 2013.
- [Asipenka et al., 2009] *Asipenka A. S., Belov A. V., Eroshenko E. A., Klepach E. G., Yanke V. G.* Interactive database on the cosmic ray Anisotropy // Adv. Space Res. 2009. V. 43, Iss. 4. P. 708–716.
- [Belov, 2000] *Belov A. V.* Large scale modulation: view from the Earth // Space Science Rev. 2000. V. 93. P. 79–105.
- [Belov, 2009] *Belov A. V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Universal Heliophysical Processes: Proc. Intern. Astronomical Union IAU Symp. 2009. V. 257. P. 439–450.
- [Belov et al., 1995] *Belov A., Dorman L. I., Eroshenko E. A., Iucci N., Villosi G., Yanke V.* Search for predictors of Forbush decreases // Proc. 24th ICRC. 1995. V. 4. P. 888.
- [Belov et al., 2003] *Belov A. V., Eroshenko E. A., Heber B., Yanke V. G., Raviart A., Muller-Mellin R., Kunov R.* Latitudinal and radial variation of >2 GeV/n protons and alpha particles in the southern heliosphere at solar maximum: Ulysses COSPIN KET and neutron monitor network observations // Annales Geophysicae. 2003. V. 21. No. 6. P. 1295.
- [Belov et al., 2005] *Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G.* Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // JGR. 2005. V. 110. A09S20. doi: 10.1029/2005JA011067.

- [Belov et al., 2007] *Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V.* Connection of Forbush effects to the X-ray flares // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2007. doi: 10.1016/j.jastp.2007.08.021.
- [Berkova et al., 2012] *Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.* Temperature effect of muon component and practical questions of how to take into account in real time // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2012. V. 8. P. 41-44. URL: www.astrophys-space-sci-trans.net/8/41/2012. doi: 10.5194/astra-8-41-2012.
- [Berkova et al., 2014] *Berkova M., Yanke V., Dorman L., Petkov V., Kostyuk M., Novoseltseva R., Novoseltsev Yu., Striganov P., Boliev M., Volchenko V., Volchenko G., Yanin A., Dzaparova I., Kochkarov M.* Barometric Effect of High-Energy Muons (>230 GeV). 2014. URL: arXiv:1402.1183v1 [astro-ph.HE], <http://arxiv.org/abs/1402.1183>
- [Blokh et al., 1959] *Blokh Ya. L., Dorman L. I., Kaminer N. S.* Determination of the character of the Earth's capture by corpuscular stream and properties of streams as well on the base of cosmic ray variation data during different type of magnetic storms // *Proc. 6th ICRC*. 1959. V. 4. P. 154–171.
- [Cane, 2000] *Cane H.* Coronal mass ejections and Forbush decreases // *Space Sci Rev.* 2000. V. 93. P. 55–77.
- [Chertok et al., 2013] *Chertok I. M., Grechnev V. V., Belov A. V., Abunin A. A.* Magnetic Flux of EUV Arcade and Dimming Regions as a Relevant Parameter for Early Diagnostics of Solar Eruptions - Sources of Non-recurrent Geomagnetic Storms and Forbush Decreases // *Solar Phys.* 2013. V. 282. P. 175–199.
- [Clem, Dorman, 2000] *Clem J. M., Dorman L. I.* Neutron monitor response functions // *Space Science Rev.* 2000. V. 93. No. 1-2. P. 335–359.
- [Dorman, 2004] *Dorman L. I.* *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground.* Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 2004.
- [Dorman, Dorman, 2014] *Dorman L. I., Dorman I. V.* *Cosmic Ray History.* N. Y.: Nova Publishers, 2014.
- [Dorman et al., 2005] *Dorman L. I., Iucci N., Belov A. V., Levitin A. E., Eroshenko E. A., Pitsyna N. G., Villoresi G., Chizhenkov G. V., Gromova L. I., Parisi M., Tyasto M. I., Yanke V. G.* Space weather and space anomalies // *Annales of Geophysicae*. 2005. V. 23, No. 9. P. 3009–3018.
- [Eroshenko et al., 2009] *Eroshenko E., Belov A., Yanke V.* Russian ground-level detectors of cosmic ray observations as a part of the world wide network: History and development // *Advances in Space Research*. 2009. V. 44. Iss. 10. P. 1207–1214.
- [Forbush, 1937] *Forbush S. E.* On the effects in the cosmic ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* 1937. V. 51. P. 1108–1109.
- [Gushchina et al., 2013] *Gushchina R. T., Belov A. V., Yanke V. G.* The observed spectrum of long-term cosmic ray variations in minimum solar activity 2009 // *J. Physics: Conference Series*. 23rd ECRS. 2013. V. 409. 012169. doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012169.
- [Kobelev et al., 2011] *Kobelev P., Belov A., Mavromichalaki E., Gerontidou M., Yanke V.* Variations of Barometric Coefficients of the Neutron Component in the 22-23 Cycles of Solar Activity // 32nd Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC): Proc. Beijing. 2011. 4 p.
- [Lockwood, 1971] *Lockwood J. A.* Forbush decreases in the cosmic ray variations // *Space Sci. Revs.* 1971. V. 12. P. 658–715.
- [Nagashima et al., 1994] *Nagashima K., Fujimoto K., Morishita I.* Interplanetary magnetic field collimated cosmic ray flow across magnetic shock from inside of Forbush decrease, observed as local-timedependent precursory decrease on the ground // *J. Geophysical Research (JGR)*. 1994. V. 99. P. 21,419–21,421.
- [Papailiou et al., 2013] *Papailiou M., Mavromichalaki H., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Kryakunova O.* Forbush Decreases Associated with Western Solar Sources and Geomagnetic Storms: A Study on Precursors // *Solar Phys.* 2013. V. 283. P. 557–563.

- [Paschalis et al., 2013] *Paschalis P., Mavromichalaki H., Yanke V., Belov A., Eroshenko E., Gerontidou M., Koutroumpi I.* An online application for the barometric coefficient calculation of NMDB stations // J. Physics: Conference Series. 23rd ECRS. 2013. V. 409.
- [Paquet et al., 2008] *Paquet E., Laval M., Belov A. V., Eroshenko E. F., Kartyshov V. G., Struminsky A. B., Zirakashvili V. N., Yanke V. G.* Definition of the snow thickness from the absorption of cosmic ray neutron component // Proc. 30th ICRC. Mexico. 2008. V. 1. P. 761–764.
- [Plainaki et al., 2010] *Plainaki C., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Andriopoulou M., Yanke V. A.* New Version of the Neutron Monitor Based Anisotropic GLE Model: Application to GLE60 // Solar Physics. 2010. V. 264. Iss. 1. P. 239–254.
- [Steigies et al., 2008] *Steigies C., Thomann M., Rother O., Wimmer-Schweingruber R., Heber B.* Real Time database for high resolution Neutron Monitor measurements // Proc. 30th ICRC. 2008.
- [Struminsky, 2005] *Struminsky A.* Three modes of particle propagation in the heliosphere // Proc. of ICRC 29th. Pune, Indi / Ed. B. Sripathi Acharya, Sunil Gupta, P. Jagadeesan, Atul Jain, S. Karthikeyan, Samuel Morris, Suresh Tonwar. Mumbai: Tata Institute of Fundamental Research, 2005. V. 1. P. 285.
- [Struminsky, Heber, 2006] *Struminsky A., Heber B.* KET ULYSSES Observations of SEP in and out of the Ecliptic // Solar Energetic Particles and Plasma. Geophys. Monograph Series. 2006. V. 165. P. 321–334.

COSMIC RAY VARIATIONS AS A TOOL FOR STUDYING SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS

A. Belov, E Eroshenko, R. Gushchina, L. Dorman, V. Oleneva, V. Yanke

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

Studying of variations of the cosmic ray intensity makes the special section of cosmic ray physics. It is possible to tell that in recent years studying of cosmic ray variations more and more turns into an independent method of probing of physical conditions in the interplanetary and interstellar environment. Here we receive a new quantitative method which irrespective of others (optical, radio-astronomical, etc.) allows one to define some interesting astrophysical characteristics. In this work the achievements of cosmic ray department of IZMIRAN for the last 25...30 years in the wide range of the scientific and applied directions are described.

Keywords: cosmic ray variations, Forbush effect, neutron monitor network, cosmic ray anisotropy, precursor of the interplanetary disturbance, ground level enhancement of solar cosmic ray, barometric effect, muon telescope, database of cosmic ray detectors.

Belov Anatoly Vladimirovich — head of laboratory, PhD, abelov@izmiran.ru

Eroshenko Evgeniya Alexandrovna — PhD, leading scientist

Gushchina Raisa Tikhonovna — PhD, leading scientist

Dorman Lev Isaakovich — doctor of physical and mathematical sciences, professor, chief scientist

Oleneva Viktoriya Alexandrovna — senior scientist, PhD

Yanke Viktor Gugovich — head of department, PhD, yanke@izmiran.ru