

СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ФИЗИКА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ИЗМИРАН (1990–2014)

Л. И. Мирошниченко

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

В статье перечислены основные направления исследования солнечных космических лучей в ИЗМИРАН, изложены наиболее существенные результаты, полученные за последние 25 лет, и приведён перечень наиболее важных, ключевых публикаций.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, ускорение частиц, солнечные протонные события, солнечно-земные связи, радиационная опасность, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

В данном обзоре кратко рассмотрим период после 50-летнего юбилея ИЗМИРАН (1989) [Белов и др., 1989]. Несмотря на хорошо известные трудности нашей науки после распада СССР, период 1989–2014 гг., тем не менее, оказался очень плодотворным для получения учёными ИЗМИРАН принципиально новых результатов в области развития новых методов диагностики и прогнозирования явлений солнечно-земной физики (СЗФ), например, солнечных вспышек и солнечных протонных событий (СПС). В частности, важные результаты были получены при изучении солнечных космических лучей (СКЛ). Исследования СКЛ в ИЗМИРАН развивались, большей частью, в русле традиционных мировых тенденций в солнечно-земной физике и в тесном сотрудничестве с учёными России, Мексики, Китая, США, Японии, Франции, Греции, Германии и ряда других стран. Вместе с тем, специалистами ИЗМИРАН были развиты собственные методы и новые интересные подходы, особенно в части изучения наземных возрастных СКЛ — так называемых событий GLE (Ground Level Enhancements of Solar Cosmic Rays).

На рубеже 1990 гг. в космофизике произошли важные события. Так, к началу 1990-х гг. в США были чётко сформулированы феноменологическая концепция корональных выбросов массы (coronal mass ejection — СМЕ) и связанная с ней известная парадигма ускорения СКЛ на фронтах ударных волн (её по-прежнему отстаивают многие американские учёные). Заметим, что хотя СМЕ были открыты ещё в 1971 г., в статье [Белов и др., 1989], написанной к 50-летию ИЗМИРАН, они даже не упоминались (в то время для СМЕ использовалось выражение «корональные транзиенты»).

Мирошниченко Леонтий Иванович — заведующий сектором, доктор физико-математических наук, leonty@izmiran.ru

К настоящему времени стало понятно, что вспышки и СМЕ представляют собой две стороны одного и того же явления — мощного возмущения (взрыва) в атмосфере Солнца. Одной из его неперенных составляющих является генерация частиц высокой энергии — солнечных космических лучей (с энергией протонов ≥ 1 МэВ). В зарубежной (англоязычной) литературе их часто называют «солнечными энергичными частицами» (SEP).

Изучение СКЛ в ИЗМИРАНе в 1990–2014 гг. проводились в основном в отделе исследования вариаций космических лучей (КЛ) и в отделе физики солнечно-земных связей. Следует отметить, что ещё в конце 1950-х гг. проблема СКЛ уже заняла особое место в общей проблеме вариаций КЛ, а в начале 1960-х гг. она превратилась в отдельную область космофизики. Ниже перечислены основные направления исследования СКЛ в ИЗМИРАНе, изложены наиболее существенные результаты, полученные за последние 25 лет, и приведён перечень наиболее важных, ключевых публикаций.

1. ИЗУЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ВЫДАЮЩИХСЯ СОБЫТИЙ

Как и ранее [Белов и др., 1989], учёные ИЗМИРАНе в 1990–2000-е гг. продолжали интенсивно изучать различные аспекты СКЛ, при этом, в основном, решались проблемы, поставленные ещё в 1980-е гг. В частности, были проанализированы наблюдения наиболее мощных солнечных протонных событий 22-го и 23-го циклов солнечной активности (СА) в различных точках гелиосферы на борту космического аппарата (КА) Ulysses и вблизи Земли (КА GOES и ACE). Этот анализ показал, что Солнце представляет собой протяжённый в пространстве и во времени источник ускоренных частиц, намного более сложный, чем думали ранее. Было показано, что усреднённый процесс распространения нерелятивистских СКЛ в гелиосфере (продольная и поперечная диффузия) до орбиты КА Ulysses (2...3 а.е.) практически не меняется от события к событию в течение двух-трёх дней после инъекции протонов в межпланетное пространство, пока возмущения солнечного ветра не достигают КА [Struminsky, 2005; Struminsky, Heber, 2006].

Во время события 28 октября 2003 г. (GLE65) нейтронный монитор Цумеб (Tsumeb, South Africa) 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 (КА INTEGRAL) для первого эпизода, возрастающая и спадающая экспоненты с характерным временем 200 с — для второго эпизода. Аналогично, во время события 20 января 2005 г. (GLE69) временной профиль интенсивности протонов в канале 80...165 МэВ имел два максимума. Было отмечено 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].

По данным 14 нейтронных мониторов (НМ), работавших в 1956 г., создана модель поведения СКЛ [Белов и др., 2005; Vashenyuk et al., 2008] в исключительно большом наземном возрастании 23 февраля 1956 г. (GLE05). Немногочисленных и не отвечающих современным требованиям нейтронных детекторов, работавших в то время, 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 релятивистских частиц (энергия $E \geq 500$ МэВ) в начале события. Несколько НМ, попавших под этот пучок, зарегистрировали возрастание в тысячи процентов. Оценка интегрального потока частиц >100 МэВ ставит изучаемое событие выше всех последующих [Белов и др., 2005; Vashenyuk et al., 2008]. Временные, пространственные и спектральные особенности GLE05 удалось непротиворечиво интерпретировать [Vashenyuk et al., 2008] на основе концепции двух релятивистских компонент (двух источников) СКЛ.

В отделе исследования вариаций по данным мировой сети станций КЛ (~40 станций) были подготовлены стандартные файлы для наземных возрастаний в октябре-ноябре 2003 г. (GLE65, GLE66 и GLE67), январе 2005 г. (GLE69), декабре 2006 г. (GLE70), а также в мае 2012 г. (GLE71). Проведён сравнительный анализ этих событий, получены оценки потоков и спектров по вновь разработанной методике [Белов и др., 2010; Plainaki et al., 2010]. Эти методические разработки стали важной составной частью международной базы данных нейтронных мониторов (NMDB, <http://www.nmdb.eu>) [Mavromichalaki et al., 2010]. Были получены и другие интересные результаты по физике вспышек и физике генерации и переноса солнечных космических лучей.

2. КОНЦЕПЦИЯ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В качестве альтернативы известной парадигме ускорения СКЛ на ударных волнах (УВ), инициируемых корональными выбросами массы, в начале 1990-х гг. нами была предложена модель [Miroshnichenko et al., 1990] и впоследствии эмпирически обоснована гипотеза о наличии двух релятивистских компонент СКЛ, связанных с двумя источниками их генерации на Солнце. Модель опирается на концепцию множественности процессов ускорения частиц на Солнце. Существование двух компонент было продемонстрировано по данным для 35 наземных возрастаний СКЛ (GLE) [Мирошниченко и др., 2013]. Интерпретация происхождения двух релятивистских компонент упирается в фундаментальные проблемы ускорения частиц на Солнце и/или вблизи него.

В последнее десятилетие в литературе очень заинтересованно обсуждается дилемма «вспышка/СМЕ». Суть дискуссии сводится к вопросу об относительном вкладе вспышек и СМЕ в генерацию СКЛ релятивистских

энергий. При современном состоянии теории ускорения сделать выбор между двумя альтернативными подходами пока не представляется возможным. Хотя ускорение на УВ является довольно медленным процессом, он мог бы, в принципе, обеспечить ускорение некоторой доли СКЛ до релятивистских энергий. Но поток СКЛ на хвосте их энергетического спектра падает очень быстро (экспоненциально), что не позволяет сделать однозначный выбор в пользу той или иной модели. В этих условиях решающее значение имеет анализ данных для так называемых «скрытых GLE», т.е. малых наземных возрастаний СКЛ, которые имеют небольшую амплитуду и регистрируются малым числом станций (в основном в полярных областях Земли). На примере одного такого события (GLE71 от 17 мая 2012 г.) было показано [Li et al., 2013], что небольшое возрастание СКЛ с энергией до 1,12 ГэВ могло быть обусловлено ударной волной от СМЕ при условии, что УВ прошла расстояние до 3,07 солнечных радиусов. Такая интерпретация, однако, не является бесспорной из-за низкой чувствительности нейтронных мониторов к СКЛ в области энергий ≤ 700 МэВ, где наземные наблюдения уже перекрывается с областью измерений на КА. Последнее обстоятельство делает весьма актуальным измерение малых потоков релятивистских СКЛ в космических экспериментах типа PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light Nuclei Astrophysics).

3. ПРОГНОЗ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

В 1990-х гг. сотрудники ИЗМИРАН впервые предложили прогностическую схему, которая в принципе позволяла предсказывать начало GLE на Земле по данным наблюдений форбуш-эффекта и анизотропии галактических космических лучей (ГКЛ) после больших солнечных вспышек [Dorman et al., 1990]. Методика опиралась на численное решение обратной задачи распространения СКЛ в межпланетной среде. Параметрами задачи были характеристики распространения ГКЛ, предварительно определённые по наблюдениям эффекта Форбуша. Затем численный код, разработанный в ИЗМИРАН ранее, позволял восстановить профиль инжекции релятивистских протонов из источника и предсказать дальнейшее развитие события после максимума GLE. Такой подход представляется перспективным, так как значительная доля СПС происходят на фазе восстановления интенсивности ГКЛ после форбуш-спада.

Впоследствии А. В. Белов и Е. А. Ерошенко [Belov, Eroshenko, 1996] разработали эмпирический метод определения спектра солнечных протонов у Земли в широком диапазоне энергий (от 10 МэВ до 10 ГэВ) непосредственно по данным наблюдений, не прибегая к каким-либо предположениям о форме спектра СКЛ. Их метод также позволяет восстановить временной профиль потока для частиц любой выбранной энергии. Было показано, в частности, что протоны с энергией 3 ГэВ могут служить хорошим предиктором поведения частиц малой энергии (например, 30 МэВ), что позволяет оценивать радиационную дозу. Метод [Belov, Eroshenko, 1996] не распространяется на случаи прихода к Земле частиц, ускоренных на фронтах УВ в межпланетной среде.

4. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЛНЕЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ

В 1994 г. нами была предложена [Мирошниченко, 1994] эмпирическая модель предельного интегрального спектра для СКЛ (ULS — Upper Limit Spectrum). Она была построена по данным о максимальных потоках солнечных частиц различной энергии на орбите Земли. Начиная с 1994 г., в ИЗМИРАН всесторонне изучается также вопрос о предельных возможностях солнечных ускорителей частиц во время взрывных явлений на Солнце. Предложенный подход к анализу СПС оказался очень плодотворным. В частности, по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) [Karov et al., 1998] были обнаружены всплески мюонов (так называемый «Баксанский эффект»), коррелирующие с наземными возрастаниями СКЛ (GLE). Эти данные свидетельствуют о том, что на Солнце могут генерироваться протоны с энергиями ≥ 100 ГэВ (до 500 ГэВ).

Современные теоретические модели не исключают ускорения солнечных частиц до таких энергий. Поэтому исследователи космических лучей в разных странах ищут экспериментальные способы для регистрации таких частиц. При этом эффекты от СКЛ обнаруживают даже на нестандартных (больших) детекторах типа IceCube (Антарктика), как это имело место 13 декабря 2006 г. (GLE70). В самые последние годы отчётливо обозначился ещё один, сугубо астрофизический аспект проблемы — возможность супервспышек на Солнце в прошлом (или будущем?), при другом уровне СА, например, в эпоху «молодого Солнца», с мощной генерацией потока релятивистских СКЛ.

5. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Это направление исследований для ИЗМИРАН оказалось совершенно новым, но естественным развитием прежней проблематики, поскольку ускорение частиц на Солнце неизбежно сопровождается взаимодействием ускоренных частиц с солнечной атмосферой. При этом рождаются вторичные всплещечные нейтроны, а также гамма-кванты различной энергии (в том числе в виде узких линий, например, линии захвата нейтрона с энергией 2,223 МэВ). Измеряя потоки гамма-квантов на орбите Земли и решая обратную задачу, можно восстановить, например, спектр ускоренных частиц и некоторые параметры их источника.

Изучение гамма-излучения от солнечных вспышек в рамках совместных проектов 2001–2012 гг. [Кужевский и др., 2005; Miroshnichenko, Gan, 2012] с Научно-исследовательским институтом ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ) и китайскими коллегами привело к обнаружению ряда особенностей в поведении плотности солнечной плазмы на уровне фотосферы (под вспышкой) для ряда мощных вспышек (эффект уплотнения фотосферы). Кроме того, были получены указания о возможном увеличении содержания гелия-3 в фотосфере за счёт преимущественного

ускорения его ионов в короне. Развитие этих исследований привело к построению новой модели источника гамма-излучения в линии захвата нейтронов 2,223 МэВ [Кичигин и др., 2012]. Модель опирается на новый механизм ускорения протонов вихревым электрическим полем и учитывает наблюдаемую пространственную асимметрию в структуре магнитных полей в короне [Кичигин и др., 2012].

6. ЧАСТОТА РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Ещё одно новое направление связано с частотой регистрации событий GLE. По наземным данным, накопленным за 70 лет наблюдений (для 70 GLEs), методом вэйвлет-анализа нам удалось выявить ряд особенностей в поведении частоты регистрации GLE в 17–23-м циклах солнечной активности [Мирошниченко и др., 2012]. Выявленные особенности мы связываем с инверсиями глобального магнитного поля (ГМП) Солнца за весь период (более 70 лет) их наблюдений (с февраля 1942 г.). Оценено количество событий GLE, которые по техническим и методическим причинам могли быть пропущены в ранних наблюдениях GLE — до февраля 1956 г., т.е. до момента оснащения мировой сети станций КЛ нейтронными мониторами. На основе методики [Perez-Peraza et al., 2011], разработанной совместно с мексиканскими учёными, была с точностью до трёх месяцев предсказана дата первого GLE текущего 24-го цикла солнечной активности (GLE71, 17 мая 2012 г.). Составлена новая таблица о «рангах» событий GLE с учётом максимального потока СКЛ в релятивистской области энергий. В этой таблице наиболее выдающиеся события GLE располагаются в таком порядке: 23 февраля 1956 г.; 20 января 2005 г.; 19 ноября 1949 г.; 25 июля 1946 г.; 7 марта 1942 г.; 28 февраля 1942 г.; 29 сентября 1989 г. Из-за вариаций наклона энергетического спектра от события к событию, измеряемый поток СКЛ в релятивистской области не может быть однозначно связан с потоком нерелятивистских частиц. Это сильно затрудняет разрешение ряда физических и прикладных проблем (ускорение, выход, прогнозирование и оценка опасных доз радиации и др.).

7. КАТАЛОГ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ (1996–2009)

Подготовка Каталога солнечных протонных событий за период 23-го цикла СА (1997–2009) была выполнена рабочей группой (РГ) «Каталог» с участием 11 специалистов из НИИЯФ МГУ (5), ИЗМИРАН (2), Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) (1), ИПГ (2), Полярный геофизический институт Кольского филиала Российской академии наук (ПГИ КНЦ РАН) (1) и Научно-исследовательский институт физики им. В. А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета (НИИФ СПбГУ) (1). Научным руководителем проекта стал Ю. И. Логачёв (НИИЯФ МГУ). Ранее примерно в том же составе РГ «Каталог» уже опубликовала несколько Каталогов СПС за период 19–22-го циклов СА.

В декабре 2014 г. работа над «Каталогом СПС (1997–2009)» успешно завершена. В настоящее время электронная версия Каталога, пригодная для дальнейших теоретических, физических и статистических исследований СПС, для их физической интерпретации и практических приложений, доступен на сайте НИИЯФ МГУ (<http://kosmofizika.ru/katalog/katalog.htm>). Предполагается издать печатную версию Каталога (НИИЯФ МГУ). С конца 2014 г. Каталог размещён также на сайте Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Москва, «Геофизический центр Российской академии наук»; http://www.wdcb.ru/stp/online_data.ru.html#ref113_r).

По материалам нового Каталога уже выполнено несколько исследовательских работ. В частности, проведено сравнение [Базилевская и др., 2015] первых 64 мес 24-го цикла СА (фазы роста и максимума) с предыдущими циклами (21–23-м) по характеристикам энергичных солнечных протонных потоков. Несмотря на низкую солнечную активность на фазе роста и максимума цикла 24-го, число солнечных протонных событий (СПС) с энергией протонов $E \geq 10$ МэВ и $E \geq 100$ МэВ в текущем цикле мало отличается от числа таких же событий в циклах 21–23-м. При этом наблюдается дефицит наиболее мощных событий типа GLE, которые характеризуются высокими значениями потока протонов с $E \geq 100$ МэВ. Отношение числа СПС с $E \geq 10$ МэВ и $E \geq 100$ МэВ к числу солнечных пятен в цикле 24-м выросло вдвое по сравнению с циклами 21–23-м, а относительное число GLE вдвое уменьшилось. Характеристики вспышек и CME, связанных с протонными событиями с $E \geq 100$ МэВ, в текущем цикле практически не отличаются от аналогичных параметров в цикле 23-м. В целом, текущий 24-й солнечный цикл демонстрирует более низкую активность, чем предыдущие циклы, и является, возможно, началом следующего «периода большого минимума».

8. ДРЕВНИЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ

В 1994 г. в ИЗМИРАН был организован сектор гелио-экологических связей. За последние 15 лет его существования удалось получить уникальные данные по акупунктуре биологически-активных точек (БАТ) в связи с гелио-геофизическими факторами. В 2011 г. в секторе началась разработка совершенно нового для ИЗМИРАН направления — изучения фундаментальной проблемы зарождения жизни и становления биосферы (космофизические аспекты). На этом направлении нами были активно использованы знания и ранее накопленный опыт [Обридко и др., 2013] по изучению солнечной активности в прошлом, солнечных и звёздных вспышек, космических лучей солнечного и галактического происхождения, физики солнечно-земных связей. Это делается с привлечением новейших астрофизических данных и современных представлений (моделей) об эволюции Солнечной системы и ко-эволюции Земли и Солнца. С использованием новых архивных данных о флюенсах нерелятивистских протонов в больших СПС за 44 цикла солнечной активности (с 1561 г. по настоящее время) была, в частности, заново построена функция распределения больших

протонных событий [Miroshnichenko, Nymmik, 2014]. Новая функция распределения СПС может быть использована для экстраполяции в прошлое и будущее, на периоды с другим уровнем СА по сравнению с нынешней эпохой. Эти результаты могут быть важны для современной практической космонавтики — при конструировании КА, планировании и осуществлении долговременных космических миссий в сторону Луны, Марса и других планет. Данные о древних протонных событиях могут найти применение также при поисках жизни или её следов на поверхности Марса, в разрешении других проблем астробиологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить также ряд обзорных статей и книг, опубликованных после 1990 г., в которых на современном уровне обобщаются результаты изучения солнечных космических лучей, их гелиофизических, геофизических и прикладных аспектов [Мирошниченко, 2011; Miroshnichenko, 2001, 2003, 2008, 2013, 2014; Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008]. В частности, в обзоре [Miroshnichenko, 2008] продемонстрирована важная роль СКЛ в интерпретации механизмов солнечно-земных связей. Новая монография [Miroshnichenko, 2014] содержит перечень спорных и нерешённых проблем солнечных космических лучей и намечает перспективы дальнейших исследований в этой динамичной и многообещающей области космофизики.

ЛИТЕРАТУРА

- [Базилевская и др., 2015] *Базилевская Г. А., Логачёв Ю. И., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., Ишков В. Н., Лазутин Л. Л., Мирошниченко Л. И., Назарова М. Н., Петренко И. Е., Ступишин А. Г., Сурова Г. М., Яковчук О. С.* Солнечные протонные события в 21-24-м циклах солнечной активности // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 629–633.
- [Белов и др., 1989] *Белов А. В., Блох Я. Л., Гущина Р. Т., Дорман И. В., Дорман Л. И., Ерошенко Е. А., Каминер Н. С., Либин И. Я., Мирошниченко Л. И., Птускин В. С., Роговая С. И., Стеблова Р. С., Янке В. Г.* Галактические и солнечные космические лучи: Вариации и происхождение // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли / Ред. В. В. Мигулин. М.: Наука, 1989. С. 49–62.
- [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., 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.
- [Кичигин и др., 2012] *Кичигин Г. Н., Мирошниченко Л. И., Сидоров В. И., Язев С. А.* Гамма-вспышки на Солнце: Динамика ускоренных ионов в эруптивных и пост-эруптивных корональных арках // Солнечно-земная физика. Иркутск: Институт СЗФ СО РАН, 2012. Т. 21. С. 79–91.

- [Кужевский и др., 2005] *Кужевский Б. М., Мирошниченко Л. И., Троицкая Е. В.* Гамма-излучение в линии 2,223 МэВ и распределение плотности в солнечной атмосфере во время вспышек // *Астрон. журн.* 2005. Т. 49. № 7. Р. 566–577.
- [Мирошниченко, 1994] *Мирошниченко Л. И.* О предельных возможностях ускорителей частиц на Солнце // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1994. Т. 34. № 4. С. 29–37.
- [Мирошниченко, 2011] *Мирошниченко Л. И.* Физика солнца и солнечно-земных связей / Под ред. М. И. Панасюка. М.: НИИЯФ МГУ: Университетская кн., 2011. 174 с. URL: lib.qserty.ru/static/tutorials/133_Miroshnichenko_2011.pdf.
- [Мирошниченко и др., 2012] *Мирошниченко Л. И., Перес-Пераса Х. А., Веласко-Эррера В. М., Запотитла Х., Ващенко Э. В.* Осцилляции галактических космических лучей и солнечных индексов перед приходом релятивистских протонов от Солнца // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2012. Т. 52. № 5. С. 579–593.
- [Мирошниченко и др., 2013] *Мирошниченко Л. И., Ващенко Э. В., Перес-Пераса Х. А.* Солнечные космические лучи: 70 лет наземных наблюдений // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2013. Т. 53. № 5. С. 579–600.
- [Обридко и др., 2013] *Обридко В. Н., Мирошниченко Л. И., Рагульская М. В., Хабарова О. В., Храмова Е. Г., Кацова М. М., Лившиц М. А.* Космические факторы эволюции биосферы: Новые направления исследований // *Проблемы эволюции биосферы: Тр. Конф., посвящённой памяти акад. Г. А. Заварзина.* 21–22 марта 2012. Сер. Гео-биологические системы в прошлом. М.: Палеонт. институт (ПИИ) РАН, 2013. С. 66–94. URL: <http://www.paleo.ru/institute/files/biosphere.pdf>.
- [Belov, Eroshenko, 1996] *Belov A. V., Eroshenko E. A.* Proton spectra of the four remarkable GLEs in the 22nd solar cycle // *Radiation Measurements.* 1996. V. 26. No. 3. P. 461–466.
- [Dorman et al., 1990] *Dorman L. I., Miroshnichenko L. I., Sorokin M. O.* Cosmic ray data as a basis for predicting the onset and development of solar proton events // *Solar-Terrestrial Predictions: Proc. Workshop at Leura, Australia, Oct. 16–20, 1989* / Eds. R. J. Thompson, D. G. Cole, P. J. Wilkinson, M. A. Shea, D. Smart, G. Heckman. NOAA, ERL, Boulder, Co., NoV. 1990. V. 1. P. 386–390.
- [Karpov et al., 1998] *Karpov S. N., Miroshnichenko L. I., Vashenyuk E. V.* Muon bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope during energetic solar phenomena // *Nuovo Cimento C.* 1998. V. 21. No. 5. P. 551–573.
- [Li et al., 2013] *Li C., Firoz K. A., Sun L. P., Miroshnichenko L. I.* Electron and proton acceleration during the first GLE event of solar cycle 24 // *Astrophys. J.* 2013. V. 770. No. 34. 11 p. doi: 10.1088/0004-637X/770/1/34.
- [Mavromichalaki et al., 2010] *Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Papaioannou A., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.* For the NMDB team: Implementation of the ground level enhancement alert software at NMDB database // *New Astronomy.* 2010. V. 15. P. 744–748.
- [Miroshnichenko, 2001] *Miroshnichenko L. I.* Solar Cosmic Rays. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2001. 480 p.
- [Miroshnichenko, 2003] *Miroshnichenko L. I.* Radiation Hazard in Space. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003. 238 p.
- [Miroshnichenko, 2008] *Miroshnichenko L. I.* Solar Cosmic Rays in the System of Solar-Terrestrial Relations: Review // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Special Issue of ISROSES Proc.* 2008. V. 70. P. 450–466.
- [Miroshnichenko, 2013] *Miroshnichenko L. I.* Cosmic Rays and Evolution of the Biosphere: Search for New Approaches // *Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле. Т. 1: Тр. Международ. конф. ИКИ РАН, Москва, 4–8 июля 2012 (Intern. Conf. “Space Weather Effects on Humans in Space and on*

- Earth”). М.: ИКИ РАН, 2013. Т. 1. С. 110–136. URL: <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>.
- [Miroshnichenko, 2014] *Miroshnichenko L. I.* Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Springer, 2014. 521 p.
- [Miroshnichenko, Gan, 2012] *Miroshnichenko L. I., Gan W. Q.* Particle Acceleration and Gamma-Rays in Solar Flares: Recent Observations and New Modeling // Advances in Space Research. 2012. V. 50. P. 736–756. doi: 10.1016/j.asr.2012.04.024.
- [Miroshnichenko, Nymmik, 2014] *Miroshnichenko L. I., Nymmik R. A.* Extreme fluxes in solar energetic particle events: Methodological and physical limitations // Radiation Measurements. 2014. V. 61. P. 6–15.
- [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008] *Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J.* Astrophysical Aspects in the Studies of Solar Cosmic Rays: Invited Review // Intern. J. Modern Physics A (IJMPA). 2008. V. 23. No. 1. P. 1–141.
- [Miroshnichenko et al., 1990] *Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J., Alvarez-Madrigo M., Sorokin M. O., Vashenyuk E. V., Gallegos-Cruz A.* Two relativistic components in some solar proton events // Proc. 21st ICRC. Australia, Adelaide. 1990. V. 5. P. 5–8.
- [Perez-Peraza et al., 2011] *Perez-Peraza J., Velasco-Herrera V., Zapotitla J., Miroshnichenko L. I., Vashenyuk E. V., Libin I. Ya.* Classification of GLEs as a Function of their Spectral Content for Prognostic Goals // Proc. 32nd Intern. Cosmic Ray Conf. Beijing, China. 2011. V. 10. P. 149–152.
- [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. P. 239–254.
- [Struminsky, 2005] *Struminsky A.* Three modes of particle propagation in the heliosphere // Proc. 29th ICRC. Pune, India. 2005. V. 1. P. 285–288.
- [Struminsky, Heber, 2006] *Struminsky A., Heber B.* KET/Ulysses observations of SEPs in and out of the ecliptic // Solar Energetic Particles and Plasma. Geophysical Monograph Ser. 2006. V. 165. P. 321–334.
- [Vashenyuk et al., 2008] *Vashenyuk E. V., Balabin Yu. V., Miroshnichenko L. I.* Relativistic solar protons in the GLE of 23 February 1956: New study // Adv. Space Res. 2008. V. 41. No. 6. P. 926–935.

SOLAR COSMIC RAYS AND SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS: INVESTIGATIONS OF SOLAR COSMIC RAYS IN IZMIRAN (1990–2014)

L. I. Miroshnichenko

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

In this short review paper we have listed the main directions of investigations of solar cosmic rays in IZMIRAN in the period of 1990–2014; also are briefly described the most essential results obtained for 25 years past, and a list of the most important, key publications is given.

Keywords: solar cosmic rays, particle acceleration, solar proton events, solar-terrestrial relations, radiation hazard, forecasting.

Miroshnichenko Leonty Ivanovich — head of division, doctor of physical and mathematical sciences, leonty@izmiran.ru