

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.46-49

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ РЕГУЛЯРНОГО БАЛЛОННОГО МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АПАТИТАХ И ДОЛГОПРУДНОМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

М.Б. Крайнев¹, Г.А. Базилевская¹, Б.Б. Гвоздевский²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия; e-mail: mkrainev46@mail.ru

²ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

Аннотация. Обсуждаются проявления магнитосферных эффектов (прежде всего высыпаний релятивистских электронов, также вариаций геомагнитного поля) в данных эксперимента регулярного баллонного мониторинга космических лучей, проводимого ФИАН с 1957 г., а также пути повышения качества эксперимента и интерпретации его результатов с использованием т.н. детальной информации, получаемой в эксперименте в последние десятилетия.

1. Введение

Регулярный баллонный мониторинг (РБМ) космических лучей в земной атмосфере проводится ФИАН им. П.Н. Лебедева с 1957 г., в настоящее время – три раза в неделю в Апатитах, Долгопрудном и обл. Мирный (Антарктика). Прибор РБМ (два счётчика Гейгера, бародатчик, радиопередатчик) описан во многих работах [1, 2]. Стандартная информация (СИ) РБМ состоит из количества зарегистрированных наземной аппаратурой импульсов, генерированных передатчиком при прохождении через детекторы ионизирующих частиц, а также давления за каждую минуту полёта. Результаты РБМ широко используются при исследованиях галактических и солнечных космических лучей [3, 4]. Кроме того, опубликована обширная база характеристик высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ), зарегистрированных в эксперименте РБМ [5].

В последние десятилетия (с 1996 г. в Долгопрудном и с 2005 г. в Апатитах), помимо СИ, регистрируется также детальная информация (ДИ) – форма каждого зарегистрированного импульса (см. [6-8]). В статье после описания прибора и типов данных РБМ (раздел 2) кратко обсуждаются основные результаты анализа ВВЭ по данным СИ РБМ в Апатитах, а также другие возможные проявления геомагнитных эффектов в РБМ (раздел 3). В следующем разделе 4 приводятся типичные примеры детальной информации, зарегистрированной в полётах РБМ в Апатитах и Долгопрудном. На этих примерах реальная работа прибора сравнивается с идеальной и обсуждаются возможные проявления магнитосферных эффектов. Наконец, в разделе 5 сформулированы пути использования ДИ РБМ для повышения качества эксперимента и интерпретации его результатов.

2. Эксперимент РБМ и типы первичных результатов эксперимента

Эксперимент РБМ, его стандартный прибор, наземная аппаратура и идеальная схема, по которой он должен функционировать, неоднократно описаны [1, 2, 8]. При прохождении любой ионизирующей частицы через стенку одиночного счётчика Гейгера-Мюллера радиопередатчик генерирует импульс заданной длительности $L_1 \approx 900$ мкс. Аналогично при прохождении любой ионизирующей частицы через три стенки счётчиков, образующих вертикальный телескоп, радиопередатчик генерирует импульс заданной длительности, причём она зависит от того, замкнут контакт бародатчика ($L_2^{in} \approx 1400$ мкс) или нет ($L_2^{out} \approx 1600$ мкс). Амплитуда U^d импульса, испущенного в направлении наземного приемного пункта, зависит от угла между этим направлением и подвеской и изменяется в процессе раскачки зонда с периодом ≈ 6 с.

Наземный радиоприёмник выделяет все импульсы с амплитудой $U^r > U_{th} = 0.7$ В и длительностью $L > L_1 = 550$ мкс, количество которых за каждую минуту полёта зонда N_1 регистрируется. Аналогично регистрируется также количество импульсов N_2 с $L > L_2 = 1250$ мкс. По моментам t_i^{in}, t_i^{out} начал и концов замыкания i -ых контактов бародатчика ($i=7$) за каждую минуту полёта зонда, используя результаты предполётной градуировки бародатчика, определяется давление (или количество вещества атмосферы над прибором X , г/см²). Кроме того, счётчики и телескопы также проходят предполётную градуировку, результатом которой являются поправки $\alpha_{1,2} = N_{1,2}^{st} / N_{1,2}$ для приведения характеристик счётчиков (размеры, эффективности), которые изменялись за более, чем 60 лет эксперимента, к стандартным. Набор N_1, N_2, X за каждую минуту полёта зонда вместе с поправками и представляет собой стандартную информацию РБМ, получаемую в разных точках с 1957 г.

Как уже упоминалось, с 1996 г. в Долгопрудном и с 2005 г. в Апатитах, параллельно с СИ, регистрируется также детальная информация – форма каждого зарегистрированного импульса. Каждый принятый импульс с амплитудой $U_i > 0.16$ В и длительностью $L > 25$ мкс оцифровывался с периодом $\Delta L = 25$ мкс и время t_i и напряжение U_i каждого отсчёта регистрировались. Таким образом, информация, содержащаяся в ДИ, значительно больше той, что содержится в СИ. Это означает, что ДИ может быть использована как для воспроизводства и контроля СИ, так и изучения ионизирующего излучения в атмосфере Земли со значительно большим разрешением как по времени, так и по длительности импульсов и их амплитуде.

3. Основные результаты по эффектам магнитосферы, полученные из стандартной информации РБМ

В последнее время характеристики более 500 событий ВВЭ, зарегистрированных в эксперименте РБМ в Мурманской области с 1961 г. и собранных в каталоге [5], были проанализированы в основном для выявления их корреляций с индексами активности Солнца, солнечного ветра и гелиосферного магнитного поля, а также с характеристиками земной магнитосферы [9-10].

Если кратко сформулировать результаты этого анализа, 1) показана устойчивая связь ВВЭ с гелиосферными и магнитосферными индексами, характерная для общих представлений о поведении электронов внешнего радиационного пояса во время магнитных бурь и суббурь; 2) продемонстрирован возрастающий тренд с 1960-х до середины 2000-х годов в однородном ряде частоты ВВЭ, отсутствующий в межпланетных и магнитосферных процессах и, возможно, связанный с влиянием наземных радиопередатчиков, работающих в ОНЧ-диапазоне.

Однако кроме ВВЭ в данных РБМ можно ожидать и другие проявления геомагнитных эффектов. Это связано с тем, что в каждом полёте зонд РБМ в течение примерно полчаса находится в области низкой плотности и высокой интенсивности ионизирующего излучения и в регистрируемой в эксперименте информации могут проявляться геомагнитные вариации, а также, например, тонкая структура ВВЭ. Но извлечь эти проявления, имея лишь данные с разрешением 1 минута (СИ), трудно.

4. Детальная информация РБМ ДИ в Апатитах и Долгопрудном

В качестве примера ДИ на Рис. 1 приведено распределение всех зарегистрированных импульсов по длительности $N(L)$, а на Рис. 2 - временной ход мгновенной скорости счёта МСС, $1/(t_{i+1}-t_i)$, амплитуды U_i и длительности L_i каждого импульса, зарегистрированного в полете в Апатитах 24.07.2017.

Кроме «нашлепок» на высотной кривой скорости счёта в конце полета, заметных на верхней панели Рис. 2 и связанных с двумя ВВЭ (или с одним, но сложного профиля), на Рис. 2 видны сильные колебания амплитуды импульсов, видимо, связанных с болтанкой (колебаниями зонда) и сильные колебания, увеличение и разброс длительности импульсов непонятного происхождения, заметные также на Рис. 1. В данном полете длительность импульсов возрастала, но часто она уменьшается, становится меньше порога, что приводит к просчётам, если не изменять соответствующим образом порог регистрации.

На верхней панели Рис. 3 для периода ВВЭ показана образованная из ДИ скорость счёта одиночного счетчика, усредненная за 1 сек (верхняя панель), а на нижней панели - амплитуда вэйвлет-преобразования полученного временного ряда (с второй производной от гауссовской функции в качестве материнского вэйвлета). Видно, что в интенсивности ионизирующей компоненты присутствует целый спектр колебаний в том числе 5-ти минутные, но для указания уровня их достоверности надо выделить в исследуемом временном ряду шум, т.е. случайную составляющую, что пока не сделано.

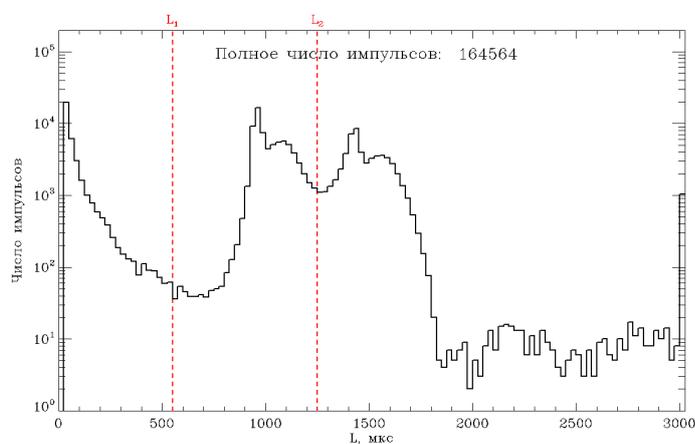


Рисунок 1. Распределение по длительности всех зарегистрированных импульсов в полете 24.07.2017 в Апатитах. Две вертикальные штриховые линии отмечают пороги регистрации СИ по длительности.

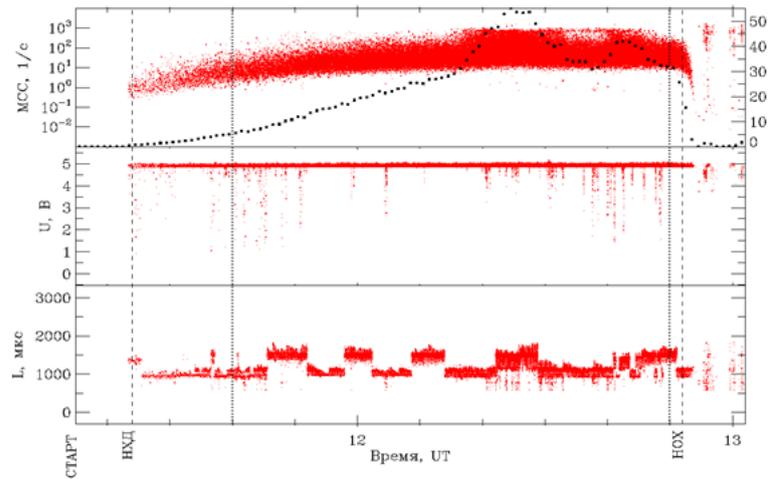


Рисунок 2. Временной ход мгновенной скорости счёта (верхняя панель, левая логарифмическая шкала), амплитуды (средняя панель) и длительности (нижняя панель) каждого импульса, зарегистрированного 24.07.2017 в Апатитах. Черными точками на верхней панели показана усредненная за 1 мин скорость счёта в линейном (правая шкала) масштабе. Более светлыми (красными) точками показаны характеристики всех импульсов от момента начала хороших данных (НХД) и до начала обратного хода (НОХ), отмеченных вертикальными штриховыми линиями. Пунктирными линиями выделен интервал времени, для которого проведён анализ колебаний скорости счёта, иллюстрированный на Рис. 2.

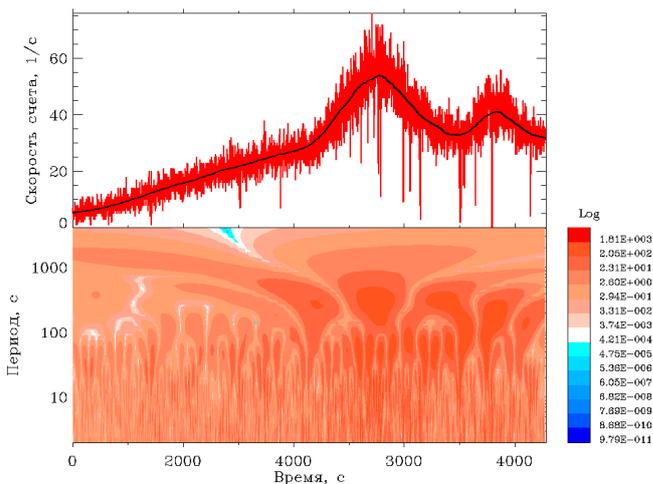


Рисунок 3. Усредненная за 1 сек (светлые/красные линии) скорость счёта одиночного счетчика в период, отмеченный пунктирными линиями на Рис. 2 (верхняя панель) и амплитуда ее вэйвлет-преобразования (нижняя панель). Чёрной линией на верхней панели показана скорость счёта, сглаженная с периодом 300 с.

В приборе РБМ, полет которого иллюстрирован на Рис. 1-3, как и во всех приборах после 2010 г., отсутствовал телескоп, что, конечно, сказалось на распределении по длительностям и т.д. Отметим, что в этой ситуации разделять события ВВЭ и сбои в аппаратуре, приводящие к всплескам скорости счёта, иногда затруднительно. В этой ситуации интересно, что во многих полётах в Долгопрудном также наблюдаются события, очень напоминающие ВВЭ, хотя геомагнитная широта Долгопрудного не позволяет отнести эти явления к высыпанию релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса. Интересно сопоставить спектр вариаций интенсивности ионизирующей компоненты на больших высотах в этих двух разнесенных по широте пунктах наблюдений.

5. Планы работ с ДИ РБМ

Для лучшего понимания работы РБМ, повышения качества эксперимента и интерпретации его результатов требуется осуществить ряд работ:

1. Работы, направленные на понимание реального функционирования зонда РБМ. Нам представляется, что в основе этой работы должно лежать симуляция электронной схемы прибора с помощью известных пакетов для моделирования аналоговых схем (например, PSPICE [11]) с учетом изменения температуры, стабильности электронных компонентов и т.д. Мы надеемся, что результатом этой работы может быть

не только понимание того, что происходило в полетах РБМ в прошлом, но и улучшение качества будущих полетов.

2. Работа по моделированию поля ионизирующих излучений в атмосфере Земли для детальной интерпретации данных РБМ. В основе может лежать использование пакета [12]. Здесь можно сформулировать две задачи:
 - 1) Уточнение характеристик различных компонент поля излучения, дающих вклад в РБМ. В частности, важно хорошо знать угловое распределение компонент для учета вклада в неизотропные детекторы РБМ, к тому же изменяющие свое положение и ориентацию в пространстве (из-за сноса и болтанки зонда). Существует оригинальная методика описания необходимых характеристик детекторов [6], но для применения ее результатов требуется знание углового распределения излучения в виде сферических функций.
 - 2) Требуются более детальные расчеты для интерпретации результатов РБМ (характеристики вторичных космических лучей в атмосфере) в терминах первичных космических лучей. Например, на основании анализа данных РБМ считается, что скорость счета одиночного счетчика $N_{1\max}$ в максимуме высотной кривой $N_1(X)$, где X – количество вещества на прибором, связана с интегральной интенсивностью протонов ГКЛ $J_p(T > 100 \text{ МэВ})$ определенным соотношением [13]. Однако хотелось бы понять, насколько это согласуется с моделированием прохождения ГКЛ через атмосферу. Важно знать, чем согласно моделированию, определяется количество вещества $X_{1\max}$, на котором максимум интенсивности достигается и т.д.
3. Методическая работа с ДИ РБМ. Требуется научиться выполнять с данными ДИ РБМ (последовательность импульсов) стандартные операции обработки, хорошо развитые для работы с временными рядами с постоянным шагом по времени (например, вэйвлет-анализ). Неясно, например, чем определяется и каков уровень шума в данных РБМ, ограничивающий надёжность выявленных вариаций интенсивности.
4. Наконец, надо привести к единообразному виду всю базу данных (БД) ДИ РБМ, которая в разные годы регистрировалась в разных форматах и сделать удобный инструмент (программную оболочку) для работы с исходными данными и БД РБМ. По окончании этой работы предполагается предоставить эту БД для работы в ИНТЕРНЕТ.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 16-02-00100_a, 18-02-00582_a).

Литература

1. Чарахчян А.Н. Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце, УФН. Т. 83. №1. С. 35–62. 1964.
2. Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K. On the stratospheric measurements of cosmic rays, *Space Science Reviews*, 85(3-4), 431-521, 1998.
3. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al., Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere, *Adv. Space Res.*, **44**(10), 1124-1137, 2009.
4. Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I. et al., Solar proton events recorded in the stratosphere during cosmic ray balloon observations in 1957–2008, *Adv. Space Res.*, **45**(5), 603-613, 2010.
5. Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al., *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **149**, 258, doi 10.1016/j.jastp.2015.12.006, 2016.
6. Корольков Д.Н., *Дипломная работа, МИФИ, Москва, 1996.*
7. Krainev M.B., Some additional results in the regular balloon monitoring of cosmic rays in the Earth's atmosphere, *Adv. Space Res.*, **44**(10), 1138-1143, 2009.
8. Крайнев М.Б., Гвоздевский Б.Б., Детальная информация в эксперименте регулярного баллонного мониторинга космических лучей в 2005–2010 гг., *Препринт ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН № 16. М., 52, 2010.*
9. Базилевская Г.А., Калинин М.С., Квашнин А.Н. и др., Высыпания высокоэнергичных магнитосферных электронов и сопутствующие характеристики солнечного ветра, *Геомагн. аэрон.*, **57**(2), 164-172, 2017.
10. Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др., Долговременная эволюция частоты высыпаний магнитосферных электронов в атмосферу Земли, *Изв. РАН, сер. физ., послана в печать, 2019.*
11. <http://www.pspice.com>
12. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMIC, *Солнечно-земная физика*, **2**(4), 3–10, 2016.
13. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др., *Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957-2007)*, *Препринт ФИАН № 14. М.: ФИАН, 77 с., 2007.*