

## ЛОКАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ В ЯПОНИИ 11 МАРТА 2011 ГОДА

А. М. Гальпер<sup>1,2</sup>, С. В. Колдашов<sup>2</sup>, А. А. Улитин<sup>2</sup>

*Приведены результаты анализа всплесков высокоэнергичных электронов, зарегистрированных в спутниковом эксперименте “АРИНА” в период развития катастрофического сейсмического события в Японии 11 марта 2011 года. Проведено сопоставление временных профилей суточного числа всплесков частиц и землетрясений с магнитудой более 4 баллов, выявлено синхронное изменение этих временных профилей.*

**Ключевые слова:** радиационный пояс, высыпание частиц, предсказание землетрясений.

1. *Локальные возмущения радиационного пояса и всплески частиц в околоземном пространстве.* В рамках федеральной космической программы в МИФИ были подготовлены и в настоящее время осуществляются спутниковые эксперименты “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”, предназначенные для радиационного мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) с целью изучения физической природы всплесков высокоэнергичных заряженных частиц (резких кратковременных возрастаний потоков частиц).

Стационарные радиационные условия в ОКП формируются суперпозицией галактических космических лучей, потоков частиц атмосферного альbedo и захваченных геомагнитным полем заряженных частиц (радиационный пояс Земли, РПЗ) [1]. Структура РПЗ представлена на рис. 1.

Сегодня большой интерес вызывают исследования изменений в радиационных условиях в ОКП вне зоны РПЗ, проявляющихся как всплески и вариации потоков заряженных частиц в широком диапазоне энергий. Впервые всплески частиц высоких энергий в

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр., 53.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

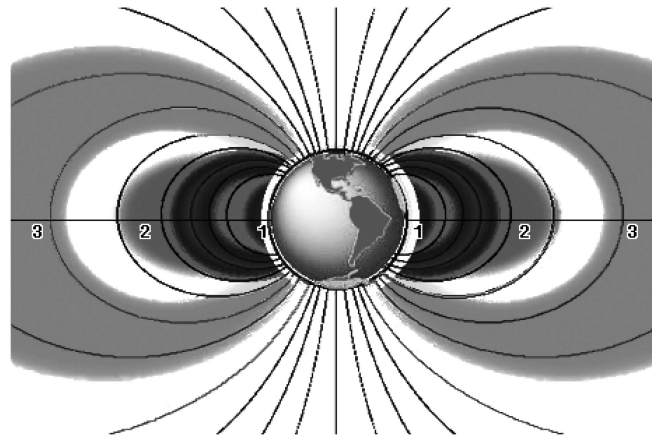


Рис. 1: Меридиональное сечение радиационного пояса Земли, дрейфовые оболочки  $L = 1 - 2$  – внутренняя часть РПЗ;  $L = 3 - 7$  – внешняя зона РПЗ.

ОКП были обнаружены в 1985 году в эксперименте “МАРИЯ”, поставленном МИФИ на орбитальной станции “Салют-7” [2]. В дальнейшем были выполнены обширные экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении, была выявлена взаимосвязь между всплесками частиц и различными солнечно-магнитосферными и геофизическими процессами (сейсмическими, грозowymi и др.) [3–12 и ссылки в них]. Из наиболее важных экспериментов отметим: при высоких энергиях (5–50 МэВ) – “МАРИЯ”, “МАРИЯ-2” [4, 5, 7] и SAMPEX/PET [8, 10], при низких – Demeter (0.3–5 МэВ) [11] и POES (0.3–2.5 МэВ) [12].

В результате этих исследований было показано, что механизм формирования всплесков высокоэнергичных заряженных частиц (в основном наблюдения относятся к электронам с энергиями порядка десятков МэВ) связан с локальными возмущениями РПЗ и состоит в следующем [3, 4]. Между высокоэнергичными электронами РПЗ и низкочастотным электромагнитным излучением (ЭМИ), генерируемым в различных геофизических и магнитосферных процессах, происходит взаимодействие, приводящее к питч-угловой диффузии частиц и опусканию их зеркальных точек. В результате происходит высыпание частиц из РПЗ на высоты ниже границы радиационного пояса. На рис. 2 показан этот процесс в случае сейсмического возмущения РПЗ. Далее высыпавшиеся частицы, если их зеркальные точки находятся не слишком глубоко в остаточной атмосфере (выше 60–80 км), дрейфуют вокруг Земли и формируют волну из высыпавшихся частиц (называемую ГКВ волной), распространяющуюся вдоль  $L$ -оболочки, содержащей зону локального возмущения РПЗ. Время полного долгого оборота высокоэнергичных частиц вокруг Земли составляет величину от нескольких десятков секунд до

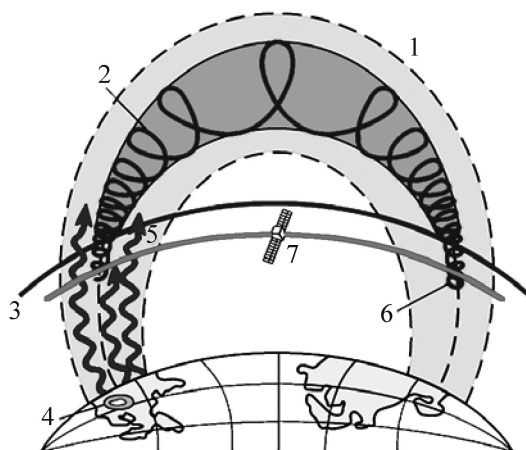


Рис. 2: Высыпание частиц радиационного пояса после взаимодействия с ЭМИ сейсмического происхождения; 1 – геомагнитная трубка, 2 – траектория частицы, 3 – нижняя граница радиационного пояса, 4 – очаг землетрясения, 5 – электромагнитное излучение, 6 – высыпающиеся частицы, 7 – траектория спутника.

нескольких минут. Поэтому за это же время  $L$ -оболочка полностью заполняется выпавшими частицами. При пересечении космическим аппаратом (КА) такой возмущенной  $L$ -оболочки приборы регистрируют всплеск частиц, который, очевидно, может быть наблюден на любой долготе, не обязательно совпадающей с долготой области локального возмущения РПЗ, а также в соответствующей этой области магнитно-сопряженной зоне. Таким образом, происходит значительное расширение области ОКП, в которой возможна регистрация всплесков частиц, образующихся при локальных возмущениях РПЗ, и возрастает вероятность их регистрации в измерениях на КА.

В работах [3, 4] было показано, что, измеряя характеристики всплеска частиц (место его регистрации, энергетические спектры и временные профили), можно определить географические координаты зоны локального возмущения РПЗ, то есть положение области, над которой произошло высыпание частиц (например, над очагом землетрясения, районом грозовой активности и др.). Отметим, что для всплесков частиц сейсмической природы было установлено, что они появляются за несколько часов до сильных землетрясений, и в настоящее время разрабатываются подходы к использованию этого эффекта для прогнозирования землетрясений [5, 13, 14]. Однако показанное выше возможное различие положений зоны наблюдения всплеска частиц в ОКП и места локального возмущения РПЗ создает дополнительные трудности при идентификации физической природы всплеска.

Поэтому сегодня, с практической точки зрения, важно понять, как по измерениям физических характеристик всплесков частиц можно определять их природу (магнитосферную, сейсмическую, молниевую, техногенную и др.), и, в частности, выявлять всплески частиц, связанные с землетрясениями.

2. *Описание экспериментов.* Разработанные в МИФИ сцинтилляционные спектрометры “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” полностью идентичны по физической схеме, имеют одинаковые физические параметры (геомфактор, энергетический диапазон, энергетическое разрешение и др.), регистрируют и идентифицируют электроны (3–30 МэВ) и протоны (30–100 МэВ), измеряют их энергии и позволяют изучать энергетические спектры и временные профили потоков частиц.

Эксперименты “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” осуществляются на низкоорбитальных КА. Прибор “АРИНА” установлен в приборном гермоконтейнере КА “Ресурс-ДК” №1 с параметрами орбиты – высотой в пределах 350–600 км и наклоном  $70^\circ$ , эксперимент проводится с середины июня 2006 года [13].

Прибор “ВСПЛЕСК” установлен вне гермообъема на Служебном модуле Международной космической станции (параметры орбиты: высота – 350–400 км, наклонение  $52^\circ$ , измерения проводятся с августа 2008 года) [14].

Толща вещества в поле зрения каждого спектрометра составляет около  $0.5 \text{ г/см}^2$ . Оси приборов перпендикулярны плоскостям орбит КА.

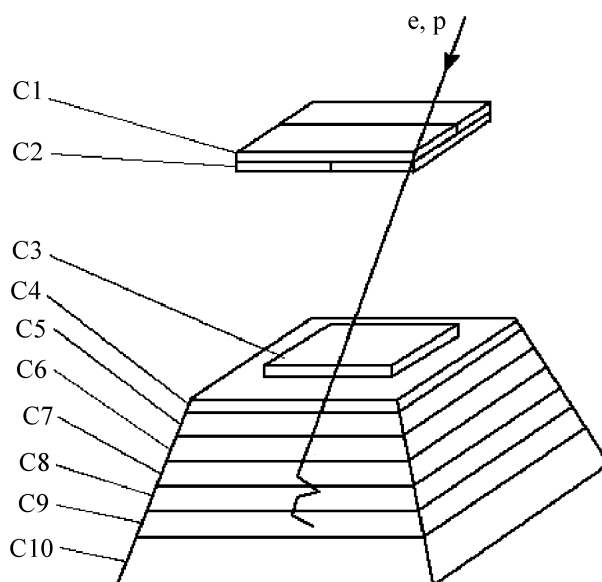


Рис. 3: Физическая схема спектрометра.

На рис. 3 представлена физическая схема многослойного сцинтилляционного детектора (МСД), который является главной частью прибора.

Заряженные частицы (электроны, протоны), движущиеся в прямом направлении (сверху вниз) и попадающие в апертуру прибора, проходят последовательно через сцинтилляционные слои С1, С2 С3 и т.д., теряют энергию и поглощаются в МСД. Частицы обратного направления и частицы, прошедшие через весь прибор, отсекаются детектором С10, работающим в режиме антисовпадений. Таким образом, остановившиеся в МСД частицы – это электроны с энергиями 3–30 МэВ и протоны с энергиями 30–100 МэВ. Они идентифицируются по энерговыделению в каждом слое при прохождении через прибор и по пробегу в нем. Энергия электронов и протонов измеряется по их пробегу в слоях МСД. Подробно физическая схема и характеристики прибора описаны в работе [15].

Спектрометр позволяет проводить измерения энергетических спектров частиц и их эволюцию, определять временные профили всплесков частиц с высоким временным разрешением, может работать в высокоинтенсивных потоках частиц. Светосила прибора, определяемая конфигурацией и расположением детекторов С1, С2 и С3, составляет величину порядка  $10 \text{ см}^2\text{ср}$ , что в несколько десятков раз выше, чем светосила аппаратуры, с помощью которой были получены основные результаты по наблюдению сейсмических эффектов в потоках частиц [8, 10]. Характеристики спектрометров “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” приведены в табл. 1. В данной работе была использована экспериментальная информация, относящаяся к интегральному потоку электронов в энергетическом интервале 3–30 МэВ.

Т а б л и ц а 1

*Физические и технические характеристики спектрометров*

1.	Геометрический фактор		$10 \text{ см}^2\text{ср}$
2.	Апертура		$\pm 30$ град.
3.	Энергетические диапазоны	для протонов для электронов	(30–100) МэВ (3–30) МэВ
4.	Энергетическое разрешение	для протонов для электронов	10% 15%
5.	Временное разрешение		100 нс
6.	Масса		8.6 кг
7.	Потребляемая мощность		13.5 Вт

### *3. Экспериментальные результаты.*

*3.1. Общая характеристика экспериментов “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”.* Прежде всего необходимо подчеркнуть, что измерения, проводимые в экспериментах “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”, более чем на порядок чувствительнее к вариациям потоков частиц по сравнению с ранее выполненными экспериментами [8, 10]. Этому удалось добиться за счет существенно большего геомфактора, что позволило дополнительно выделять слабые всплески частиц. Проведение практически непрерывных измерений дало возможность накопить статистику по всплескам частиц, достаточную для проведения статистического анализа и изучения физической природы всплесков частиц на новом качественном уровне [13, 14, 16].

В каждом эксперименте были выявлены всплески высокоэнергичных заряженных частиц. В дальнейшую обработку и анализ были отобраны всплески частиц на уровне 4.5 стандартных отклонений и выше, имеющие продолжительность от нескольких секунд до нескольких минут. Всего за время проведения экспериментов таких всплесков частиц было обнаружено: около 200 в эксперименте “АРИНА” и около 50 в эксперименте “ВСПЛЕСК”.

В работах [3, 4, 14] были рассмотрены возможности дистанционной диагностики локальных возмущений РПЗ на основе данных о характеристиках регистрируемых в ОКП всплесков частиц и показаны примеры регистрации сейсмических и молниевых возмущений РПЗ. В работе [16] были выявлены всплески частиц непосредственно в зонах локальных возмущений РПЗ, и, в частности, обнаружено, что такие всплески частиц группируются вдоль линий тектонических разломов и над районами повышенной грозовой активности.

*3.2. Всплески частиц в период развития сейсмического события в Японии 11 марта 2011 года.* Эксперименты “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” проводятся практически в непрерывном режиме измерений потоков высокоэнергичных протонов и электронов. Тем не менее, в эксперименте “ВСПЛЕСК” регулярно возникают пропуски в информационных потоках, связанные с невысоким быстродействием бортовой телеметрической системы, что, в частности, привело к потере информации, относящейся к рассмотренному ниже катастрофическому сейсмическому событию в Японии 11 марта 2011 года. В эксперименте “АРИНА” аналогичные информационные потери не превышают 5%–10%, и представленные экспериментальные результаты по этому событию были получены по данным эксперимента “АРИНА”.

Мощное сейсмическое событие в Японии, начавшееся 11 марта 2011 года землетрясением с магнитудой 9 баллов, сопровождалось необычно высокой афтершоковой активностью с числом землетрясений ( $M > 4$  баллов) до 140 в сутки. Таким образом, в данном случае применяемый ранее метод анализа [8], основанный на выделении двух генетически связанных событий (всплеск частиц и землетрясение) и рассчитанный на относительно редкие события (менее 10 в сутки), не может быть использован. Тем не менее, следует отметить, что в области, геомагнитно-сопряженной с сейсмически активной зоной Японии, в 03:42:27 UT был зарегистрирован всплеск частиц (на уровне 3.2 стандартных отклонения), который, по-видимому, мог быть предвестником первого основного землетрясения ( $M = 9$ ), произошедшего в 05:46:23 UT.



Рис. 4: Выбранная для анализа область Японии.

Применительно ко всему сейсмическому событию был реализован следующий подход в анализе всплесков высокоэнергичных заряженных частиц. Был выбран район Японии с географическими координатами в диапазонах долгот  $140^{\circ}$ – $155^{\circ}$  и широт  $33^{\circ}$ – $45^{\circ}$  (рис. 4). Далее в этом районе (в ОКП над ним) определялся временной профиль

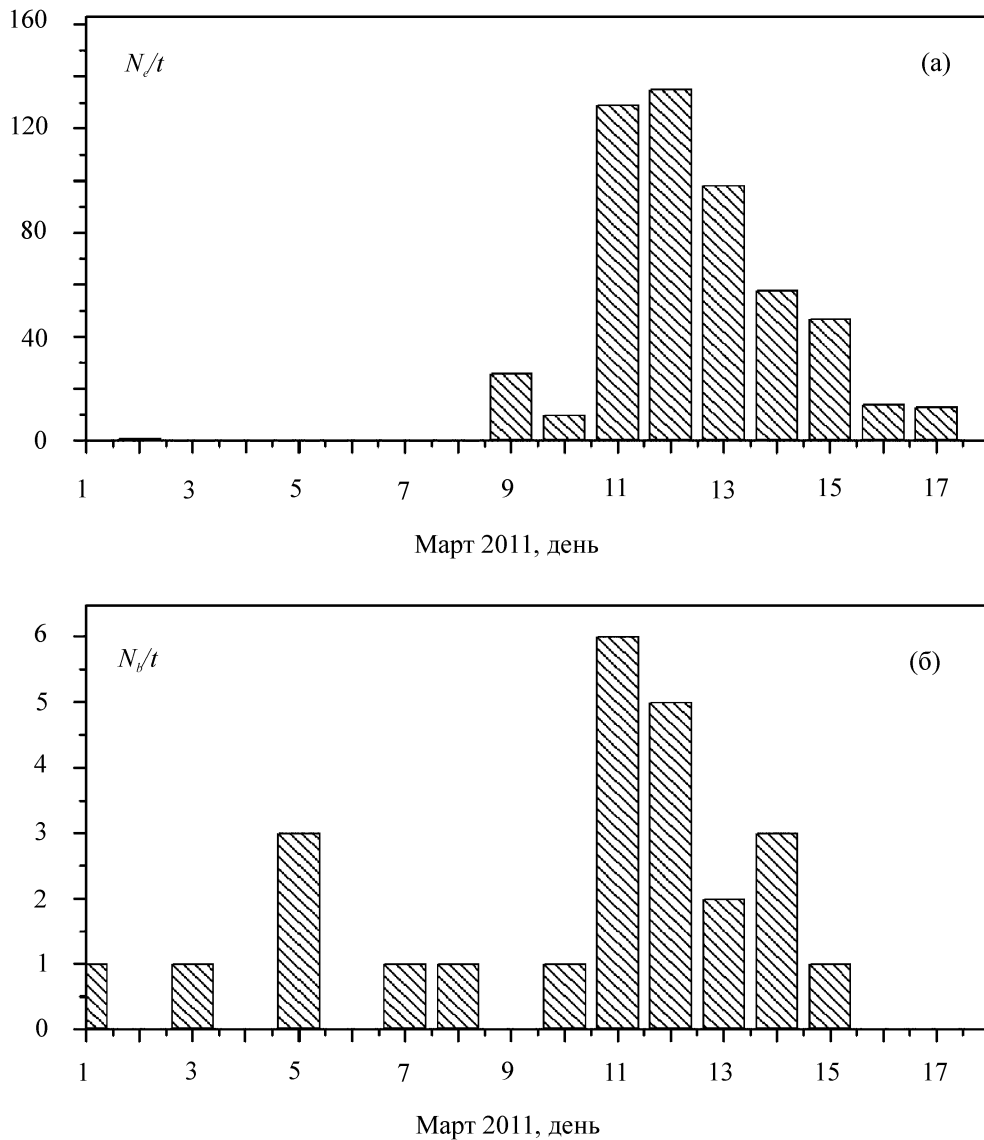


Рис. 5: (а) число землетрясений ( $M > 4$ ), (б) число всплесков частиц, эксперимент «АРИНА».

темпа счета всплесков частиц  $N_b/t$  (число всплесков в сутки) на временном отрезке до сейсмического события и в период его развития. И, затем, на этом же временном интервале проводилось сравнение  $N_b/t$  с поведением суточного числа землетрясений ( $N_e/t$ ) с магнитудой выше заданной (например, 4 балла по шкале Рихтера; использовался каталог ANSS: <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>).



Поведение  $N_b/t$  и  $N_e/t$  в период с 1 по 16 марта показано на рис. 5(а) и 5(б).

Видно резкое увеличение числа всплесков частиц в несколько раз, начиная с 11 марта 2011 года, коррелирующее с резко возросшим числом землетрясений в выбранном районе. При этом надо учитывать, что наблюдение всплесков частиц в конкретной области на одном космическом аппарате сильно ограничено по времени, поскольку КА пересекает эту зону не более нескольких раз в сутки и время ее пересечения составляет около нескольких минут. Сейсмические же события наблюдаются наземными геофизическими службами непрерывно. Поэтому число зарегистрированных землетрясений существенно превышает число обнаруженных всплесков частиц.

*Заключение.* Представленные в данной работе результаты наблюдений динамики потоков высокоэнергичных электронов в ОКП в период развития сейсмического события в Японии 11 марта 2011 года являются примером сейсмомагнитосферной связи и демонстрируют возможность использования этого явления для спутникового мониторинга землетрясений.

Авторы выражают благодарность Роскосмосу, ЦСКБ “Прогресс” и НЦ ОМЗ за техническую и финансовую поддержку эксперимента “АРИНА”.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. Редерер, *Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем*. Пер. с англ., (М., Мир, 1972).
- [2] S. A. Voronov, A. M. Galper, V. G. Kirillov-Ugryumov, et al., *Proceedings of 20th International Cosmic Ray Conference, Moscow, Russia, 1987* (Nauka, Moscow, 1997), vol. 4, p. 451.
- [3] А. М. Гальпер, С. В. Колдашов, А. М. Мурашов, *Космические исследования* **38**(1), 102 (2000).
- [4] М. Е. Алешина, С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., *Космические исследования* **30**, 79 (1992).
- [5] A. M. Galper, S. V. Koldashov, S. A. Voronov, *Advance Space Research* **15**, 131 (1995).
- [6] С. Ю. Александрин, С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., *Известия РАН, сер. физ.* **65**(1), 400 (2001).
- [7] С. Ю. Александрин, С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., *Известия РАН, сер. физ.* **67**(4), 79 (2003).

- [8] S. Yu. Aleksandrin, A. M. Galper, S. V. Koldashov, et al., *Annales Geophysicae* **21**, 597 (2003).
- [9] С. Ю. Александрин, А. М. Гальпер, С. В. Колдашов, А. М. Мурашов, *Известия РАН, сер. физ.* **69**(6), 872 (2005).
- [10] V. Sgrigna, L. Carota, L. Conti, et al., *J. Atm. Solar-Terrestrial Phys.* **67**, 1448 (2005).
- [11] M. Parrot, J. J. Berthelier, J. P. Lebreton, et al., *Physics and Chemistry of the Earth* **31**, 486 (2006).
- [12] C. Fidani, R. Battiston, W. J. Burger, *Remote Sensing* **2**, 2170 (2010).
- [13] А. В. Бакалдин, А. Г. Батищев, С. А. Воронов и др., *Космические исследования* **45**(5), 471 (2007).
- [14] С. Ю. Александрин, А. В. Бакалдин, А. Г. Батищев и др., *Известия РАН, сер. физ.* **73**(3), 379 (2009).
- [15] А. Г. Батищев, С. А. Воронов, С. В. Колдашов и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 25 (1999).
- [16] С. Ю. Александрин, А. М. Гальпер, С. В. Колдашов и др., *Труды 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва, 2010 (Москва, МГУ, 2010), GEO\_9; [http://cr2010.sinp.msu.ru/papers/geo\\_09.pdf](http://cr2010.sinp.msu.ru/papers/geo_09.pdf).*

Поступила в редакцию 21 июня 2011 г.