

## АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Влияние солнечных вспышек на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве в марте–апреле 2013 г. — возможности оперативного мониторинга**

И. Н. Мягкова<sup>a</sup>, В. О. Барина, С. Ю. Бобровников, О. Г. Барин, Н. А. Власова, С. А. Доленко, В. В. Калегаяев, Е. А. Муравьева, М. О. Рязанцева, В. Р. Широкий, Ю. С. Шугай

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*E-mail: <sup>a</sup>irina@srd.sinp.msu.ru*

Статья поступила 30.04.2013, подписана в печать 31.05.2013.

Настоящая работа посвящена оперативному анализу влияния солнечных вспышек, ставших источником солнечных космических лучей, на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве в период с 1 марта по 18 апреля 2013 г.

*Ключевые слова:* солнечные космические лучи, радиационные пояса Земли, солнечный ветер, геомагнитные возмущения.

УДК: 550.385.4. PACS: 92.60.hw, 94.30.Xy, 96.60.Vg.

**Введение**

С начала космической эры прошло уже более полувека и чем дальше, тем актуальнее становится обеспечение радиационной безопасности космических полетов, в том числе и пилотируемых. С развитием и усложнением космической техники, усилением роли навигации с использованием космических систем, человечество стало гораздо более зависимым от процессов, происходящих в ближнем космосе, и возможность оперативно оценивать, а также прогнозировать эти процессы стала насущной необходимостью. С увеличением числа космических экспериментов и их продолжительности все острее стоит вопрос оперативного получения, хранения и обеспечения доступа к информации космических экспериментов. Это становится особенно актуальным в современных условиях, когда появились технические возможности не только передавать данные с борта космического аппарата (КА) на Землю, но и визуализировать их на специализированных порталах в Интернете практически мгновенно, т. е. в «онлайн»-режиме.

Мониторинг радиационных условий в космическом пространстве необходим для обеспечения безопасности экипажей и пассажиров самолетов на полярных трассах, пилотируемых космических полетов и предотвращения сбоев электронной аппаратуры при возрастаниях потоков солнечных космических лучей (СКЛ) [1, 2]. Это вызвано тем, что солнечные протоны с энергией 20–500 МэВ вносят существенный вклад в суммарную радиационную дозу [3].

В настоящее время в распоряжении исследователей имеется достаточное количество данных космических

экспериментов как в геостационарных КА (например, GOES и «Электро-Л»), так и в КА с квазикруговыми полярными орбитами высотой до 1000 км (например, КА серии POES NOAA, «Метеор-М № 1»). Мониторинг радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве (ОКП) традиционно осуществляется при помощи геостационарных КА. Так, на крупнейшем портале «Центр прогнозирования космической погоды» (Space Weather Prediction Center) в качестве мониторинговых данных на главной странице используются данные КА серии GOES [4].

Что же касается данных с низкоорбитальных полярных спутников, то простых и доступных систем оперативного анализа радиационных условий на высотах 300–1000 км, при помощи которых можно было бы легко сравнивать данные, получаемые на малых высотах, с мониторинговыми измерениями на геостационарной орбите, до сих пор не существует. Это, в частности, вызвано спецификой поступающей информации, связанной с особенностями орбиты: спутник последовательно проходит разные области магнитосферы Земли, а именно полярные шапки, область внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ), средние широты, область внутреннего РПЗ. В результате этого сравнение с данными других экспериментов возможно только после разделения получаемой информации в соответствии с проходимыми КА областями ОКП и последующей синхронизации с данными геостационарных КА. Традиционно данные экспериментов на КА с круговыми полярными орбитами представляют в виде карт интенсивности потоков заряженных частиц. Так, например, это сделано на портале Space Weather Prediction Center с данными, получаемыми на КА серии

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2012-1.2.2-12-000-1012-003, соглашение № 8705 «Разработка системы оперативного мониторинга радиационных условий в высокоширотных областях околоземного космического пространства».

POES — Polar Orbiting Environmental Satellite [5]. Первая версия альтернативной системы оперативного представления данных, получаемых в экспериментах на КА с полярными круговыми орбитами, где демонстрируются не временные зависимости потоков заряженных частиц вдоль орбиты, а потоки в полярных шапках, представлена на главной странице сайта Центра данных космического мониторинга НИИЯФ МГУ [6] наряду с данными эксперимента на геостационарном КА «Электро-Л». На данный момент времени — весна 2013 г. — функционирующим российским КА с полярной круговой орбитой является «Метеор-М № 1».

Целью настоящей работы является комплексный анализ потоков СКЛ по данным измерений российских и зарубежных КА на геостационарной орбите и на малых (820 км) высотах в период марта-апреля 2013 г. Исследование выполнено на основе автоматизированной системы оперативного мониторинга радиационной обстановки в ОКП, разрабатываемой в рамках Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ (<http://swx.sinp.msu.ru>) [7].

### 1. Методика автоматизированной обработки данных экспериментов на круговых полярных орбитах

Принципиальным отличием данных экспериментов на КА с круговыми полярными орбитами высотой до 1000 км от экспериментов на других орбитах является то, что на малых высотах, на разных участках орбиты регистрируются заряженные частицы разной природы — СКЛ, частицы внешнего и внутреннего РПЗ.

Поэтому при решении задач мониторинга и оперативного анализа информации следует разделять данные, поступающие со спутника, в соответствии с их природой. При анализе получаемой информации крайне существенно понять: имеют регистрируемые частицы солнечное или магнитосферное происхождение. Таким образом, потоки получаемой в спутниковом эксперименте информации должны разделяться в соответствии с физическими областями ОКП, в которых эта информация была получена.

Основное влияние на динамику радиационных условий в высокоширотных областях ОКП на высотах 300–1000 км могут оказывать три «популяции» заряженных частиц: а) частицы СКЛ — протоны, электроны, ядра; б) частицы внешнего РПЗ — электроны; в) частицы внутреннего РПЗ — протоны, электроны, ядра.

Влияние внутреннего радиационного пояса Земли на изменение радиационной обстановки на малых высотах в рамках настоящей работы не рассматривалось, поскольку внутренний РПЗ характеризуется достаточной пространственной и временной стабильностью [8].

Эта стабильность обуславливает значительно больший, чем мы рассматривали в рамках настоящей работы (годы и десятилетия по сравнению с часами и сутками), временной масштаб вариаций интенсивности потоков заряженных частиц.

Предлагаемая в настоящей работе методика заключается в автоматизированной оценке радиационных условий, связанных с двумя основными факторами, влияющими на радиационную обстановку в ОКП, —

потоками энергичных заряженных частиц солнечных космических лучей и внешнего радиационного пояса Земли.

Данная процедура легко осуществима, поскольку при регистрации потоков энергичных заряженных частиц вдоль орбиты КА для каждого момента измерения вычисляются и фиксируются географические координаты каждой точки измерения — широта, долгота, высота, а также геомагнитные координаты. Следовательно, высокоширотные части орбиты любого КА с круговой полярной орбитой можно разделить на области  $L > 8-10$  и  $L = 3-7$ . Данные области будут соответствовать областям полярных шапок (ПШ), где регистрируются потоки СКЛ, и зоне внешнего РПЗ.

Здесь  $L$  — параметр Мак-Илвайна — одна из двух координат,  $L$  и  $B$ , используемых в физике магнитосферы и космических лучей для описания распределения потоков заряженных частиц в диполеподобном поле [9]. Величина  $L$  примерно равна отношению среднего удаления реальной магнитной оболочки от центра Земли в плоскости геомагнитного экватора к радиусу Земли [10]. Значения  $L$  и  $B$  вычисляются по трем пространственным координатам КА с использованием стандартного приближения главного геомагнитного поля, так называемого IGRF — International Geomagnetic Reference Field (Международного эталонного геомагнитного поля) [11].

Метод автоматического разделения потоков энергичных заряженных частиц, регистрируемых на низких полярных орбитах, использует координаты Мак-Илвайна ( $L, B$ ). На каждом витке КА дважды пролетает полярную область, следовательно, наблюдается два локальных максимума  $L$ -координаты.

Алгоритм разделения потоков энергичных заряженных частиц состоит в следующем:

1) на каждом витке выбираются два периода времени, от момента входа в область, где  $L$ -координата превышает значение 8 для протонов и 10 для электронов, до момента выхода из этой области;

2) для каждого из этих периодов вычисляются средние значения потока протонов и потока электронов, т. е. проводится суммирование, и полученная сумма делится на величину периода времени, за который данный суммарный поток был получен в каждой полярной шапке;

3) полученные значения заносятся в базу данных на момент времени, соответствующий полусумме моментов времени входа и выхода из области.

Таким образом, дважды за виток (примерно раз в 45 минут) мы получаем средние значения потоков СКЛ в полярных шапках. Разделение на север и юг позволяет изучать асимметрию прихода СКЛ в полярные шапки. Потоки протонов и электронов разделяются на уровне разных каналов регистрации приборами на борту КА.

Следует отметить, что без предварительной фильтрации данных по  $L$  невозможно осуществить сравнение данных экспериментов на низковысотных КА с полярными орбитами не только с данными с геостационарной орбиты, но и данных низковысотных экспериментов между собой. Это вызвано тем, что потоки СКЛ регистрируются в полярных шапках, а вариации потоков электронов ВРПЗ — в областях ВРПЗ, и

в эти области пространства каждый из КА с круговой полярной орбитой попадает в разное время. Вследствие этого показания детекторов заряженных частиц с разных полярных КА в один и тот же момент времени оказываются различными. Сравнение данных разных КА является краеугольным камнем космофизического исследования, так как подтверждением достоверности получаемых с орбиты данных является в первую очередь непротиворечивость показаний, полученных в разных экспериментах, осуществлявшихся одновременно.

С другой стороны, с прикладной точки зрения наиболее важной особенностью разрабатываемой в рамках проекта системы является возможность оперативного анализа поступающих с борта КА данных. Система анализа космической погоды НИИЯФ МГУ [7] позволяет по данным измерений параметров плазмы, магнитного поля и потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли и в солнечном ветре восстанавливать в режиме реального времени основные характеристики воздействия солнечной активности на геомагнитную обстановку и радиационное окружение Земли. Такая оперативность позволит наладить систему оповещения о возрастании радиационной опасности в высокоширотных областях ОКП.

Таким образом, предлагаемая в данной работе методика автоматического разделения потоков энергичных заряженных частиц, регистрируемых на низких полярных орбитах, позволит оперативно зафиксировать возрастания потоков солнечных космических лучей и вариации потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли на высотах до 1000 км. Контроль за уровнями потоков энергичных заряженных частиц с использованием описанной методики может осуществляться в режиме реального времени по мере получения спутниковых данных.

## 2. Эксперименты

В настоящей работе мы использовали данные, полученные в экспериментах на спутниках «Электро-Л» и «Метеор-М № 1», являющихся российскими космическими аппаратами гидрометеорологического назначения.

КА «Метеор-М № 1», предназначенный для оперативного получения информации в целях прогноза погоды, контроля озонового слоя и радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, а также для мониторинга морской поверхности, включая ледовую обстановку, был выведен 17 сентября 2009 г.

на круговую полярную солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 820 км и наклоном 98.77°.

Геостационарный гидрометеорологический космический комплекс (ГГКК) «Электро-Л» был запущен на геостационарную орбиту (высота ~36000 км, долгота: 76° E) 20 января 2011 года. Он предназначен для обеспечения Росгидромета оперативной информацией для анализа и прогноза погоды, изучения состояния акваторий морей и океанов, мониторинга условий для полетов авиации, а также изучения состояния ионосферы и магнитного поля Земли.

На КА «Электро-Л» и «Метеор-М № 1» установлена научная аппаратура, разработанная и созданная в НИИЯФ МГУ — спектрометры энергичных заряженных частиц, способные регистрировать потоки протонов и электронов, источниками которых могут быть как солнечные вспышки, так и радиационные пояса Земли.

На КА «Электро-Л» регистрация осуществляется в южном направлении, перпендикулярном плоскости орбиты, на КА «Метеор-М № 1» — в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в зенит и по вектору скорости. Схема спектрометра СКЛ-Э, установленного на КА «Электро-Л», и его подробное описание представлены в работе [12]. Спектрометр состоит из полупроводникового детектора типа  $dE/dx$ , имеющего толщину чувствительного слоя ~300 мкм Si, и двух сцинтилляционных детекторов на основе кристалла CsI(Tl) размером  $h20 \times \varnothing 15$  мм и  $h5 \times \varnothing 20$  мм. Аналогичные спектрометры были установлены на КА «Метеор-М № 1».

## 3. События на Солнце, в гелиосфере и в магнитосфере Земли в марте–апреле 2013 г.

Вспышечная и геомагнитная обстановка в марте и в первой половине апреля 2013 г., несмотря на близость к максимуму 24-го цикла солнечной активности (СА), не являлась сильно возмущенной. Так, в марте 2013 г., несмотря на то что среднемесячное число Вольфа составляло  $W = 81$ , а максимальное за месяц, зафиксированное 15 марта,  $W = 133$ , вспышек класса M произошло всего три — 5, 15 и 21 марта. В первой половине апреля, когда среднемесячное число Вольфа еще выросло, изменившись от 84 (1 апреля) до 163 (10 апреля), наблюдалось еще три вспышки класса M. Информация обо всех шести вспышках приведена в таблице. Указаны моменты начала, максимума и конца вспышки, номер активной области (АО), координаты вспышки, ее класс в мягком рентгеновском

Солнечные вспышки в марте — первой половине апреля 2013 г.

№	Дата, дд/мм	Время начала–максимума–конца	АО	Координаты АО	Класс/Балл	Протоны СКЛ (макс. Ер)
1	05/03	07:47-07:54-07:59	1686	S15W54	M1.2/SF	1 МэВ
2	15/03	05:46-06:58-08:35	1692	N11E12	M1.1/1F	10 МэВ
3	21/03	21:42-22:04-22:36	1692	лимб	M1.6/—	—
4	05/04	17:34-17:48-18:04	1719	залимб.	M2.2/—	—
5	11/04	06:55-07:16-07:29	1719	N09E12	M6.5/3B	> 100 МэВ
6	12/04	19:52-20:38-20:46	1718	—	M3.3/—	—

излучении по данным GOES, оптический балл и максимальная энергия протонов, ускоренных во вспышке.

Из таблицы видно, что источники протонов СКЛ с энергией выше 10 МэВ были зафиксированы только для двух из шести приведенных вспышек. Отсутствие регистрации СКЛ в трех из оставшихся вспышек легко объяснимо: две из них произошли вблизи лимба, а третья (5 марта) была очень слабой и не дала протонов с энергией выше 10 МэВ. При этом возрастание потока электронов с энергией 175–315 МэВ примерно в три раза по сравнению с фоном было зафиксировано на КА АСЕ. Отсутствие же какого-либо возрастания потоков СКЛ после вспышки класса 3.3 в АО 1718, находившейся 12 апреля (исходя из координат АО 1718 за предыдущий и последующий дни) в районе 38–40° западной долготы, объяснить сложнее.

Источником возрастания потока СКЛ, начало которого было зарегистрировано 15 марта 2013 г., стала вспышка класса М1.1 (номер 2 в таблице). Как видно из таблицы, данная вспышка произошла в активной

области АО 1696, которая в момент вспышки находилась почти в центре диска. С этой вспышкой связан также корональный выброс массы (КВМ), зарегистрированный прибором LASCO (на КА SOHO) около 7 ч 30 мин мирового времени (UT) и имевший начальную скорость около 900 км/с, который в свою очередь стал источником ударной волны и ускорил протоны малых энергий (до 10 МэВ).

Наиболее мощное возрастание потоков СКЛ за рассматриваемый период было вызвано вспышкой М6.5, зарегистрированной 11 апреля 2013 г. (номер 5 в таблице). Данная вспышка также сопровождалась корональным выбросом массы, который был зарегистрирован прибором LASCO около 7 ч мирового времени (UT).

На рис. 1 на двух верхних панелях представлены данные о параметрах межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ) за рассматриваемый период времени. На рис. 1, а показаны среднечасовые значения параметров ММП — полного вектора межпланетного магнитного поля  $B$  (сплошная серая линия)

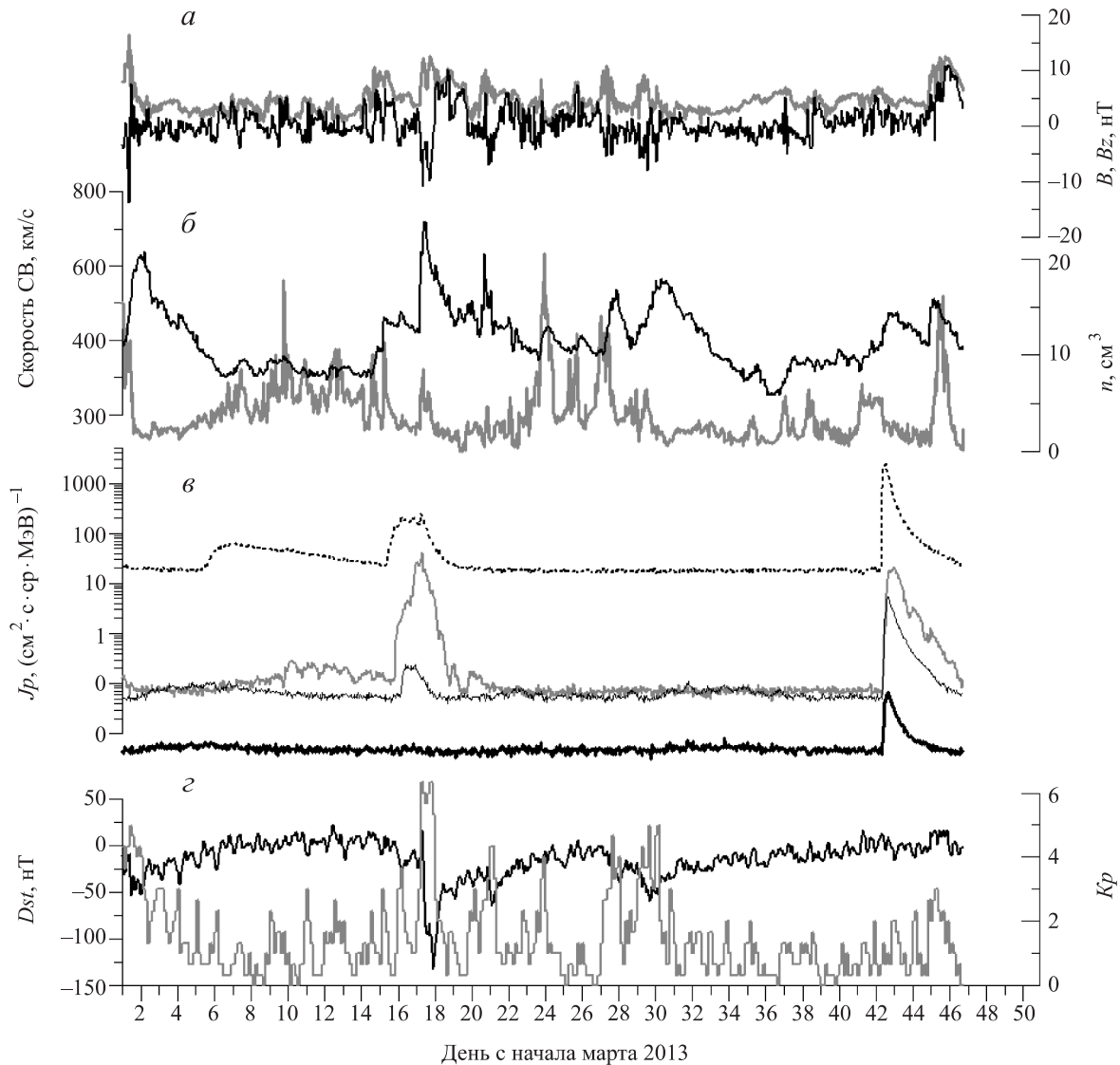


Рис. 1. Временные зависимости параметров межпланетного магнитного поля, скорости и плотности солнечного ветра, потоков электронов и протонов СКЛ по данным экспериментов на КА АСЕ, «Электро-Л» и GOES-13, а также геомагнитных индексов, в марте–апреле 2013 г.

и вертикальной составляющей вектора магнитного поля  $B_z$  (сплошная черная линия), по данным КА ACE, которые были получены из базы данных OMNI Годдардовского центра космических полетов (Goddard Space Flight Center) [13]. На рис. 1, б приведены скорость СВ ( $V_{св}$  — сплошная черная линия) и плотность СВ ( $n$  — сплошная серая линия), также по данным КА ACE.

На панели рис. 1, в представлен временной ход потоков СКЛ — электронов с энергией 175–300 кэВ по данным КА ACE (пунктирная линия) и протонов 4–9 МэВ по данным GOES (сплошная серая линия), 13.5–23 МэВ по данным «Электро-Л» (тонкая черная линия) и 42–112 МэВ по данным «Электро-Л» (жирная черная линия). Временные зависимости величины геомагнитных индексов — Dst (сплошная черная линия) и Kp (тонкая пунктирная линия) даны на самой нижней панели г). Как можно видеть из рис. 1, максимальные значения геомагнитных параметров Dst-вариации и Kp-индекса (Dst = –132 нТ и Kp = 6.3) наблюдались поздно вечером 17 марта 2013 г., когда к орбите Земли пришел корональный выброс массы, связанный со вспышкой M1.1, произошедшей на Солнце 15 марта 2013 г.

Среднечасовая скорость СВ в момент прихода КВМ по данным КА ACE составила 714 км/с, что является максимальным значением скорости СВ для рассматриваемого периода. Максимальная плотность при этом была не слишком велика — около 8 частиц/см<sup>3</sup>. Отметим, что амплитуда Dst была обусловлена не только высокой скоростью СВ, а еще и амплитудой и длительностью отрицательного значения  $B_z$  ММП — минимальное значение  $B_z$  составило около –10 нТ. Согласно современным представлениям, силовые линии магнитосферы Земли пересоединяются с силовыми линиями ММП при южной ориентации последнего (см., например, [14, 15]). Расстояние до подсолнечной точки в рассматриваемом событии резко уменьшилось и в момент минимального значения  $B_z$  его значение, вычисляемое в [7] по модели, представленной в работе [16], составило 5.8 радиуса Земли. Ключевая роль величины  $B_z$  для развития магнитной бури наглядно демонстрируется благодаря динамике параметров ММП, СВ и геомагнитных индексов во время прихода к Земле КВМ, связанного со вспышкой M6.5 11 апреля. При скорости СВ более 500 км/с и плотности около 16 частиц/см<sup>3</sup>, величина  $B_z$  ММП была отрицательной (–4 нТ) всего 1 ч, а остальное время ММП имело северную ориентацию, в результате чего значение Dst было положительным, при том, что Kp-индекс достигал 3. Минимальное расстояние до подсолнечной точки здесь составило 8.8 радиуса Земли [7].

Рассмотрим подробнее, как повлияли события СКЛ, вызванные вспышками 15 марта и 11 апреля, на радиационную обстановку в ОКП.

#### **4. Изменения радиационных условий в околоземном космическом пространстве, вызванные солнечными вспышками в марте–апреле 2013 г.**

Как уже было сказано выше, потоки СКЛ в экспериментах на КА, имеющих круговую полярную орбиту, регистрируются в области открытых силовых линий —

полярных шапках. На рис. 2 на двух верхних панелях представлен подробный временной ход потоков СКЛ после вспышки 15 марта, который демонстрирует возможности оперативного мониторинга потоков СКЛ в полярных шапках на высотах 300–1000 км. На рис. 2, а показан временной ход потоков электронов СКЛ с энергиями > 100 кэВ, регистрировавшихся в полярных шапках в эксперименте на КА «Метеор-М № 1» с 14 по 18 марта 2013 г. Данные были отобраны автоматической системой мониторинга [6] при значениях  $L$  выше 10. Открытые треугольники соответствуют значениям потоков электронов СКЛ в северной ПШ, кресты — в южной. Для сравнения приведены потоки электронов с энергиями 175–315 кэВ, регистрируемые на КА ACE прибором ЕРАМ — пунктирная линия. Данные с ACE мы были вынуждены использовать, поскольку в экспериментах на КА на геостационарной орбите, которая расположена на границе внешнего радиационного пояса, солнечные электроны, как правило, не регистрируются.

На рис. 2, б приведены аналогичным образом полученные потоки протонов СКЛ с энергией 1–100 МэВ, также регистрировавшиеся в ПШ в эксперименте на КА «Метеор-М № 1» с 14 по 21 марта 2013 г.: открытые ромбы — в северной ПШ, закрытые — в южной, отобранные автоматической системой мониторинга [6] при значениях  $L$  выше 8. Более высокое значение  $L$  при отборе электронов вызвано необходимостью надежно исключить попадание в отбираемые данные потоков электронов ВРПЗ и высыпаний электронов на его полярной границе. Из рис. 2, б видно, что асимметрии прихода СКЛ в пределах ошибок измерения не наблюдается. Для сравнения приведены потоки протонов СКЛ на геостационарной орбите: 4–9 МэВ (сплошная линия с крестами) и 9–15 МэВ (сплошная серая линия) по данным эксперимента на КА GOES, 13.5–23 МэВ (тонкая черная линия с открытыми кружочками), 23–42 МэВ (тонкая черная линия), 42–112 МэВ (пунктирная серая линия) по данным КА «Электро-Л».

На рис. 2 хорошо видно, что временные профили потоков СКЛ, как протонов, так и электронов, измеренные на КА «Метеор-М № 1» в полярных шапках и автоматически отфильтрованные с помощью разрабатываемой в НИИЯФ МГУ системы оперативного мониторинга, повторяют профили потоков СКЛ, полученные в межпланетном пространстве и на геостационарной орбите.

На рис. 2, в приведены геомагнитные индексы Kp и Dst. Сравнение временного хода геомагнитных индексов и потоков СКЛ показывает, что смягчение спектра протонов СКЛ, а также достижение максимума потоков электронов происходило во время главной фазы магнитной бури, вызванной приходом к орбите Земли КВМ. Такое смягчение спектра, как было ранее показано в работе [17], связано с приходом к Земле протонов малых энергий, ускоренных ударной волной КВМ. При этом энергия СКЛ после вспышки 15 марта не превышала 40 МэВ; в канале 42–112 МэВ (серая пунктирная линия) поток оставался на уровне фонового значения.

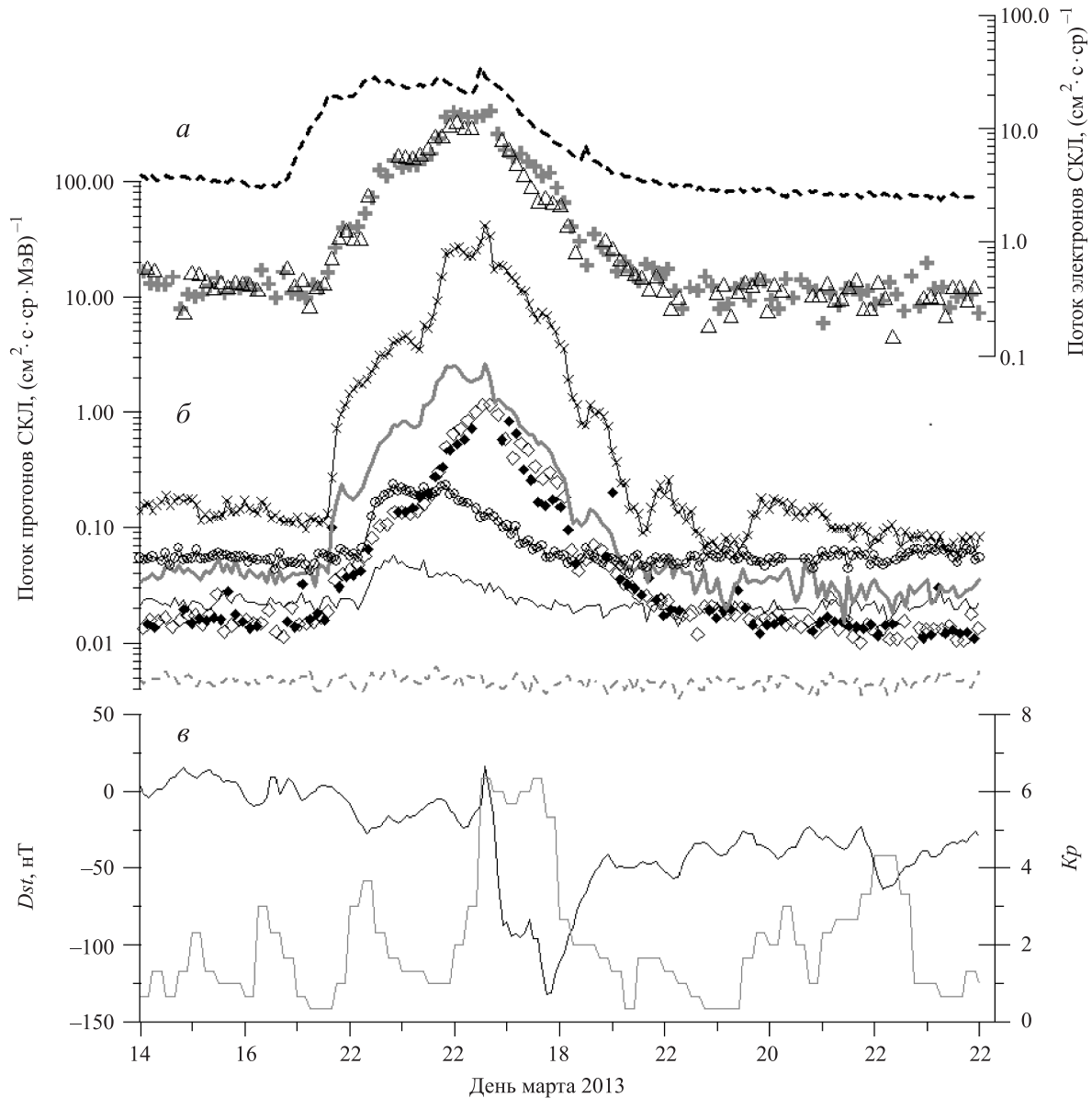


Рис. 2. Временной ход потоков электронов и протонов СКЛ по данным КА ACE, «Метеор-М № 1», «Электро-Л» и GOES-13 и геомагнитных индексов в период с 14 по 21 марта 2013 г.

На рис. 3 приведены временные зависимости потоков СКЛ с 11 по 16 апреля, ускоренных во вспышке 11 апреля 2013 г.

Структура рис. 3 аналогична структуре рис. 2, с той разницей, что на рис. 3, б, помимо всех энергетических каналов с рис. 2, показаны еще данные о потоках протонов СКЛ с энергией 112–320 МэВ по данным «Электро-Л» — полужирная черная линия. Как можно видеть, в данном энергетическом канале наблюдается возрастание потока протонов СКЛ примерно в 2 раза.

Как уже было сказано выше, после прихода к орбите Земли КВМ, связанного со вспышкой 11 апреля, магнитная буря не развилась из-за положительного  $B_z$  ММП. Смягчения спектра СКЛ не наблюдалось. Асимметрии прихода СКЛ в ПШ в данном событии также не наблюдалось.

На рис. 2 и 3 хорошо видно, что форма временных профилей потоков СКЛ в полярных шапках, по данным

эксперимента на КА «Метеор-М № 1», полученных при помощи автоматической фильтрации по величине  $L$ -оболочки, аналогична профилям потоков протонов и электронов СКЛ в межпланетном пространстве и на геостационарной орбите. Это говорит о правильности работы, разрабатываемой системы оперативного мониторинга.

## 5. Обсуждение

Анализ потоков СКЛ в период марта–апреля 2013 г. на геостационарной орбите и малых (820 км) высотах показывает, что только треть — две из шести — вспышек класса М (по жесткому рентгеновскому излучению) существенно повлияли на радиационную обстановку в ОКП. При этом рентгеновский балл вспышки 15 марта был ниже, чем у вспышки 12 апреля — М1.1 и М3.3 соответственно, а положение АО 1692 на диске Солнца (гелиодолгота  $E 11^\circ$ ) не было более выигрыш-

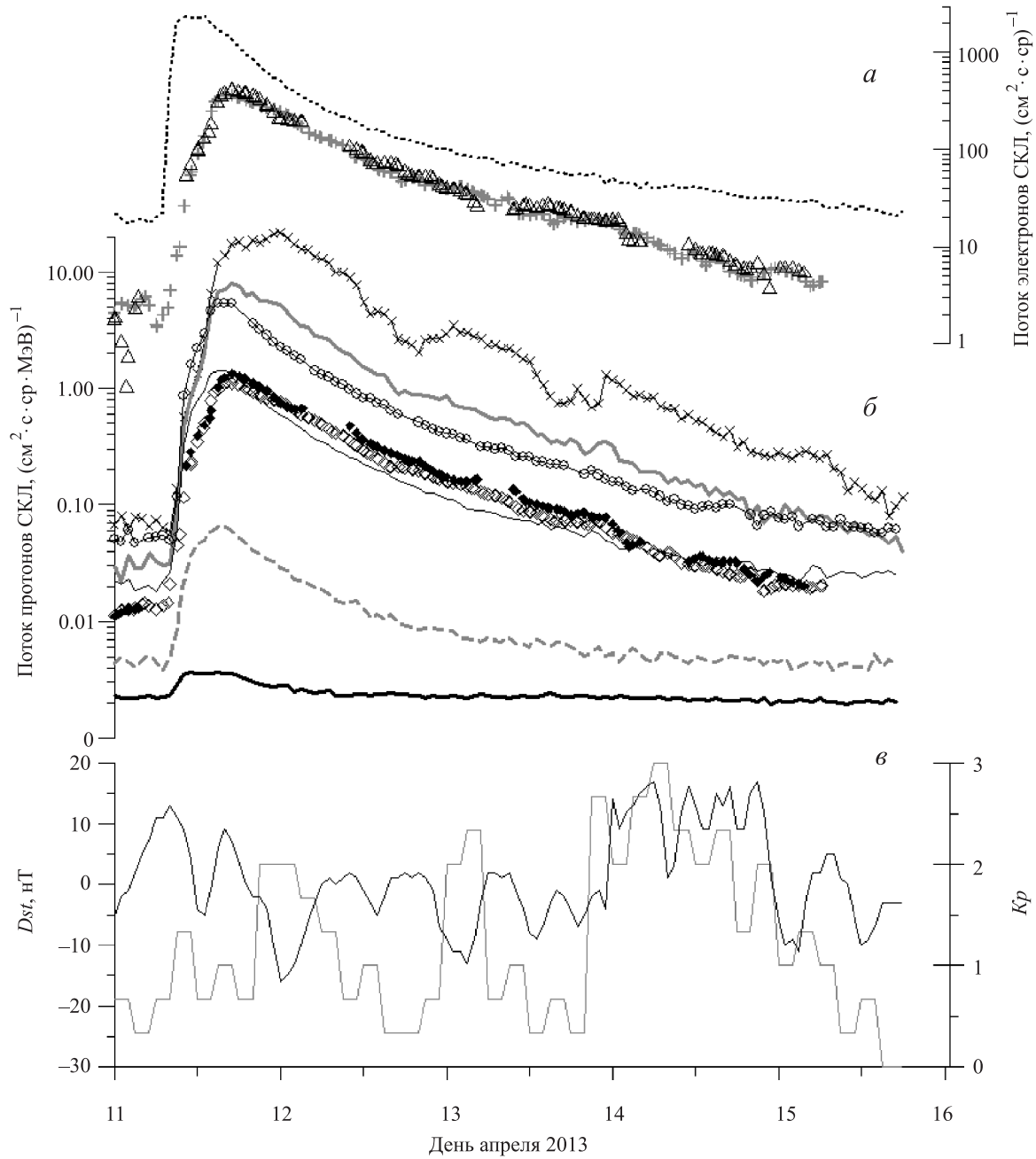


Рис. 3. Временной ход потоков электронов и протонов СКЛ по данным КА ACE, «Метеор-М № 1», «Электро-Л» и GOES-13 и геомагнитных индексов в период с 11 по 15 апреля 2013 г.

ным, чем АО 1718 12 апреля (гелиодолгота W30-40°). В работе [18], в которой анализировались события СКЛ трех последних циклов солнечной активности, сделан вывод, что преимущество с точки зрения геоэффективности, т.е. достижения потоками СКЛ обреты Земли, имеют вспышки, происходящие в западном полушарии Солнца. Тем не менее возрастания потока СКЛ даже малых энергий после вспышки не было зарегистрировано. Это говорит о существенных сложностях при предсказании появления возрастания потока СКЛ у Земли по рентгеновскому баллу вспышки.

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что максимальная энергия солнечных протонов, зарегистрированных во втором событии, была существенно выше, чем в первом. После вспышки 15 марта поток частиц с энергией

выше 40 МэВ оставался на фоновом уровне, а 11 апреля возрастание потоков протонов СКЛ наблюдалось и при энергиях выше 100 МэВ. При этом максимальное значение потока протонов с энергиями ниже 9 МэВ 17 марта, после прихода к орбите Земли КВМ, примерно в два раза превышает максимальное значение потока протонов СКЛ в данном энергетическом диапазоне сразу после второй вспышки 11 апреля. Это говорит о достаточной эффективности ускорения протонов малых энергий ударной волной коронального выброса массы. При этом временной профиль потока протонов с энергией 13.5–23 МэВ («Электро-Л») и 9–15 МэВ (GOES) дает основания утверждать, что ускорение на ударной волне происходило до энергий примерно 15 МэВ, поскольку в данных GOES возраста-

ние в момент прихода к Земле КВМ наблюдается, а по данным «Электро-Л» — уже нет. Характерное резкое смягчение спектра протонов СКЛ при приходе КВМ ранее отмечалось, например, в работе [19].

Максимальный поток протонов с энергией, например, 23–42 МэВ после вспышки 11 апреля превосходил поток в этом же энергетическом канале после вспышки 15 марта в 30 раз, что как раз и является существенным с точки зрения возрастания радиационной дозы, вызванного приходом протонов СКЛ с энергией выше 20 МэВ [3].

Что касается потоков электронов СКЛ с энергией выше 100 кэВ в полярных шапках (ПШ), то для них максимальный поток во втором событии превышает поток в первом событии примерно в 20 раз на орбите «Метеор-М № 1».

Приведенные результаты оперативного мониторинга радиационной обстановки в ОКП на высотах до 1000 км, в частности сравнение данных, полученных на геостационарной орбите (КА «Электро-Л») и в ПШ на малых высотах (КА «Метеор-М № 1»), показывают работоспособность данной системы.

### Заключение

Анализ результатов одновременных измерений потоков СКЛ на КА «Электро-Л» и «Метеор-М № 1» показал, что разрабатываемая в НИИЯФ МГУ автоматизированная система мониторинга радиационных условий в ОКП позволяет оперативно оценивать воздействие солнечных космических лучей на радиационную обстановку в ОКП на малых высотах. С помощью данной системы было проведено сравнение результата воздействия на радиационную обстановку в ОКП протонов и электронов СКЛ, ускоренных во вспышках 15 марта и 11 апреля 2013 г., как между собой, так и с вариациями потоков СКЛ на геостационарной орбите и в межпланетном пространстве. Было показано, что в первом событии СКЛ максимальная интенсивность потоков протонов малых энергий достигалась при приходе к Земле КВМ, т. е. основную роль играли протоны малых (до 10 МэВ) энергий, ускоренные на ударной волне КВМ.

Выполненная работа демонстрирует эффективность методики разделения по  $L$  информации, получаемой с КА с круговыми полярными орбитами, реализованной в рамках автоматизированной системы космической погоды НИИЯФ МГУ, а также перспективность оперативного мониторинга радиационной обстановки в ОКП с одновременным использованием космических аппаратов с круговыми полярными и геостационарными орбитами.

Авторы благодарят следующие организации и научные команды: Space Weather Prediction Center, Boulder, CO; National Oceanic and Atmospheric Administration, World Data Center for Geomagnetism, Kyoto; Центр данных космического мониторинга НИИЯФ МГУ; International Service of Geomagnetic Indices, Potsdam; GOES13 (East) и GOES15 (West), ACE SWEPAM и ACE EPAM, SOHO/LASCO за возможность использования данных космических и наземных экспериментов.

### Список литературы

1. Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И. и др. // Космич. исслед. 2004. **42**, № 3. С. 211.
2. Кузнецов Н.В. Модель космоса. Т. I. Физические условия в космическом пространстве / Под ред. проф. М.И. Панасюка. М., 2007. Гл. 3.5. С. 627.
3. Иванов В.И. Курс дозиметрии. М., 1988.
4. Портал Центра прогнозирования космической погоды (Space Weather Prediction Center). <http://www.swpc.noaa.gov>.
5. NOAA POES на портале Центра прогнозирования космической погоды (Space Weather Prediction Center). <http://www.swpc.noaa.gov/tiger/index.html>.
6. Центр данных космического мониторинга НИИЯФ МГУ — Space Monitoring Data Center, SINP MSU. <http://smdc.sinp.msu.ru>.
7. Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ. <http://swx.sinp.msu.ru>.
8. Кузнецов Н.В., Николаева Н.И., Панасюк М.И. // Космич. исслед. 2010. **48**, № 1. С. 81.
9. McIlwain C.E. // J. Geophys. Res. 1961. **66**, N 11. P. 3681.
10. Мурзин С.В. Введение в физику космических лучей. М., 1979.
11. Международное эталонное геомагнитное поле — International Geomagnetic Reference Field. <http://www.ngdc.noaa.gov/IGAG/vmod/igrf10coeffs.txt>.
12. Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Калегаев В.В. и др. // Космич. исслед. 2013. **51**, № 5. С. 355.
13. База данных OMNI Годдардовского центра космических полетов (Goddard Space Flight Center). <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>.
14. Merkin V.G., Goodrich C.C. // Geophys. Res. Letters. 2007. **34**. L09107. doi: 10.1029/2007GL029357.
15. Lemaire J.F., Batteux S.G., Slypen I.N. // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. **67**. P. 719.
16. Shue J.H. et al. // J. Geophys. Res. 1998. **103**. P. 17,691. doi: 10.1029/98JA01103.
17. Кузнецов С.Н., Денисов Ю.И., Мяжкова И.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. **67**, № 4. С. 478.
18. Белов А., Гарсия Г., Курт В. и др. // Космич. исслед. 2005. **43**, № 3, С. 165.
19. Веселовский И.С., Мяжкова И.Н., Яковчук О.С. // Астрон. вестник. 2012. **46**, № 3. С. 235.



**Influence of solar flares on the near-earth space radiation environment in March–April 2013 — possibilities of operational monitoring****I. N. Myagkova<sup>a</sup>, V. O. Barinova, S. Yu. Bobrovnikov, O. G. Barinov, N. A. Vlasova, S. A. Dolenko, V. V. Kalegaev, E. A. Mouravieva, M. O. Ryazantseva, V. R. Shiroky, Yu. S. Shugai***D. V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: <sup>a</sup> irina@srd.sinp.msu.ru.*

The present study is devoted to the operational analysis of the influence of solar flares, which produced solar cosmic rays, on the near-earth space radiation environment in the period from March 1 to April 18, 2013.

*Keywords:* solar cosmic rays, radiation belts of Earth, solar wind, geomagnetic disturbances.

PACS: 92.60.hw, 94.30.Xy, 96.60.Vg.

*Received 30 April 2013.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2013).

**Сведения об авторах**

1. Мягкова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.
2. Баринаова Вера Олеговна — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-58-62; e-mail: alisawera@gmail.com.
3. Бобровников Сергей Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-58-62; e-mail: bobrovnikov@msu.ru.
4. Баринов Олег Георгиевич — канд. хим. наук, вед. программист; тел.: (495) 939-58-62; e-mail: biohim@gmail.com.
5. Власова Наталия Андреевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-06; e-mail: nav19iv@gmail.com.
6. Доленко Сергей Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-46-19; e-mail: dolenko@srd.sinp.msu.ru.
7. Калегаяев Владимир Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: (495) 939-19-15; e-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.
8. Муравьева Екатерина Александровна — программист I категории; тел.: (495) 939-58-62; e-mail: katyamur@gmail.com.
9. Рязанцева Мария Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-10; e-mail: oream@gmail.com.
10. Широкий Владимир Романович — программист; тел.: (495) 939-46-19; e-mail: usopppp@gmail.com.
11. Шугай Юлия Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-46-19; e-mail: jshugai@srd.sinp.msu.ru.