

УДК 524.1-52:523.9550.385

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА СПУТНИКЕ *АРКТИКА-М № 1*

© 2022 г. В. И. Оседло¹, В. В. Калегаев^{1,2}, И. А. Рубинштейн¹, В. И. Тулупов¹, А. А. Шемухин¹,
Н. Н. Павлов¹, О. И. Абанин¹, И. А. Золотарев¹, В. О. Баринава¹, В. В. Богомолов¹,
Н. А. Власова^{1, *}, И. Н. Мягкова¹, Е. А. Гинзбург³

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия
*nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 07.03.2022 г.

После доработки 25.05.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Рассматриваются первые результаты по мониторингу радиационного состояния околоземного космического пространства на космическом аппарате *Арктика-М № 1*, расположенном на высокоапогейной орбите типа *Молния*. Приводятся характеристики приборов гелиогеофизического аппаратного комплекса – ГГК-ВЭ. Представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных и модельных распределений потоков энергичных частиц радиационных поясов Земли на орбите *Арктика-М № 1*, а также исследования некоторых особенностей динамики внешнего электронного радиационного пояса в 2021 и 2022 гг. и солнечного протонного события 28.X.2021 по экспериментальным данным с космических аппаратов *Арктика-М № 1*, *Метеор-М № 2* и *Электро-Л № 2*.

DOI: 10.31857/S0023420622060085

ВВЕДЕНИЕ

Солнечно-земные связи – одно из фундаментальных понятий космической физики, описывающее механизмы воздействия солнечной активности на состояние околоземного космического пространства. Важность этого научного направления связана с развитием практической космической деятельности: для сохранения работоспособности электронной бортовой аппаратуры требуется предусмотреть возможные изменения физических условий (“космической погоды”) на орбитах КА. После запуска первых космических аппаратов стало ясно, что космическая среда оказывает целый ряд нежелательных и часто опасных воздействий на технику и экипажи космических миссий (например, [1–4]). Основными поражающими факторами являются энергичные солнечные частицы и частицы радиационных поясов Земли и космическая плазма. Достоверная информация о потоках заряженных частиц этих появлений может предотвратить опасные воздействия космической погоды на электронную аппаратуру КА. Наиболее эффективным средством для оценки степени радиационной опасности, а также для прогноза космической погоды является мониторинг факторов космического простран-

ства на искусственных спутниках Земли. Уже на первых спутниках в Советском Союзе и в США была установлена научная аппаратура для исследования заряженных частиц. В результате были открыты радиационные пояса Земли [5–7]. Особый интерес представляет внешний электронный радиационный пояс, впервые зарегистрированный в эксперименте на ИСЗ *Спутник-2*, проведенном коллективом сотрудников НИИЯФ МГУ под руководством С.Н. Вернова в ноябре 1957 г. [8]. В 1964 г. были запущены четыре советских ИСЗ серии *Электрон*. Цель серии – исследование радиационных поясов Земли и связанных с ними физических явлений. Орбиты были высокоэллиптическими, так что спутники могли исследовать радиационные пояса на всем их протяжении. Исследования на спутниках *Электрон* показали высокую изменчивость электронного радиационного пояса и относительную стабильность протонного (например, [9]). На основании полученных данных были созданы первые модели космической радиации, позволяющие оценивать радиационную опасность при полетах космических аппаратов и разрабатывать меры радиационной защиты. Модели вошли в первое и последующие издания сборника “Модель космоса”, издаваемые

в НИИЯФ МГУ (например, [10]). Данные спутников *Электрон* послужили важным экспериментальным подтверждением модели радиальной диффузии частиц радиационных поясов Земли под действием флуктуаций магнитного поля [11]. Спутники серии *Молния* в 70-х гг. 20 в. предоставили новые возможности в изучении структуры и динамики радиационных поясов не только электронов и протонов, но и более тяжелых ионов [12]. Эксперименты на спутниках серии *Молния* были началом создания в НИИЯФ МГУ системы глобального радиационного мониторинга околоземного пространства, которая в дальнейшем получила развитие с использованием и других спутников: *ГЛОНАСС*, *Космос*, *Горизонт* и другие (например, [13–15]). С целью создания системы мониторинга загрязнения геофизических сред радиоактивными продуктами в 1956 г. был создан Институт Прикладной Геофизики (ИПГ). ИПГ осуществляет постоянное радиационное обеспечение космических полетов и предоставляет обширную информацию о космической погоде (<http://ipg.geospace.ru>).

Созданные модельные представления по потокам частиц радиационных поясов Земли не всегда позволяют адекватным образом прогнозировать уровень радиационного воздействия, особенно в геомагнитно-возмущенных условиях [16–19]. Динамика внешнего электронного радиационного пояса – не до конца решенная проблема физики магнитосферы.

Важный фактор, значительно повышающий радиационный риск космических полетов, – потоки солнечных энергичных частиц, ускоренных во время солнечных вспышек и корональных выбросов массы. Измерения потоков солнечных частиц предусмотрены на всех космических аппаратах, начиная с первых спутников и по настоящее время. Большую роль в систематизации знаний о солнечных протонных событиях играют каталоги и модели, которые, в то же время, являются необходимым инструментом для планирования и обеспечения безопасности космических миссий (например, [20–21]).

В связи с освоением геостационарной орбиты возникла проблема электризации КА, возникающей в результате воздействия на КА горячей магнитосферной плазмы (например, [1]). Созданные на основе экспериментальных данных модели электризации широко используются на стадии проектирования КА [4].

Для предупреждения потенциально опасных последствий изменений в радиационной обстановке необходим оперативный мониторинг и прогнозирование параметров, характеризующих состояние околоземное космическое пространство (ОКП) [22–23]. Космические аппараты в ОКП (например, серий *Метеор*, *POES*, *Электро*,

GOES, *Арктика*) позволяют получать информацию о потоках заряженных частиц в режиме близком к реальному времени. В НИИЯФ МГУ создан Центр Данных Оперативного Космического Мониторинга (ЦДОКМ) для обеспечения доступа к оперативным данным космических экспериментов и моделям оперативного прогнозирования явлений космической погоды [<http://swx.sinp.msu.ru/>].

Цель данной работы – обсуждение возможностей и преимуществ использования результатов измерений потоков заряженных частиц с помощью научной аппаратуры, созданной в НИИЯФ МГУ и ИПГ и установленной на космических аппаратах, находящихся на орбитах в широком диапазоне высот: эллиптическая высокоапогейная орбита типа “Молния” (ИСЗ *Арктика-М № 1*), полярная низковысотная (ИСЗ *Метеор-М № 2*) и геостационарная (ИСЗ *Электро-Л № 2*) – для мониторинга и прогноза радиационного состояния околоземного космического пространства. Особое внимание будет уделено спутнику *Арктика-М № 1*, запуск которого открыл новые возможности для осуществления программы космического мониторинга радиационных условий в ОКП.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТЫ И НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Арктика-М № 1 – гидрометеорологический спутник, запущенный на орбиту ракетой-носителем “Союз-2.16” 28.11.2021. Цель создания спутниковых систем на высокоэллиптических орбитах – информационное обеспечение при решении задач оперативной метеорологии, гидрологии, агрометеорологии, мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе. Два КА *Арктика-М* должны обеспечить круглосуточный всепогодный мониторинг поверхности Земли и морей Северного Ледовитого океана, а также постоянную и надежную связь. Одной из задач экспериментов на борту КА *Арктика М № 1* является исследование динамики радиационных условий в высокоширотной магнитосфере.

Арктика-М № 1 – первый из двух аппаратов, которые будут работать на высокоэллиптической орбите типа “Молния” со следующими параметрами:

- период обращения КА 43565 с (~12.1 ч);
- высота перигея от 600 до 3000 км;
- наклонение 63.3°;
- высота апогея 37400–39800 км

[https://www.laspacespace.ru/press/news/information_brochure_arctic.pdf].

В течение одних суток КА *Арктика-М № 1* совершает два витка вокруг Земли. На каждом витке высокоэллиптической орбиты КА имеются рабочие участки продолжительностью около 6.5 ч в интервале от минус 3.5 ч до плюс 3.5 ч от апогея, а

Таблица 1. Энергетические интервалы измерительных каналов электронов СЭР

Канал	Электроны					
	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Энергия, (МэВ)	0.15–0.35	0.35–0.7	0.7–1.7	1.7–4.0	4.0–10.0	>1.7

Таблица 2. Энергетические интервалы измерительных каналов протонов СЭР

Канал	Протоны											
	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	П14	П15	П16	П17	П18
Энергия, (МэВ)	2–4	4–9	9–17	17–30	30–60	60–100	100–160	>160	1.5–4	>30	>70	>100

вне рабочего участка КА *Арктика-М № 1* дважды попадает в область радиационных поясов Земли.

Научная аппаратура, размещенная на спутнике, практически совпадает с аппаратурой на КА серии *Электро-Л*. В состав научной аппаратуры входят:

- многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС), предназначенное для получения многоспектральных изображений облачности и поверхности Земли в видимом и ИК диапазонах в пределах видимого диска Земли во всем диапазоне условий наблюдения и выдачи цифровой информации в бортовую систему сбора данных;

- гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГГЭК-ВЭ), назначением которого является непрерывное получение гелиогеофизических данных на высоте орбиты с целью:

- контроля и прогноза вспышечной активности Солнца;

- контроля и прогноза радиационной обстановки в ОКП и состояния геомагнитного поля;

- диагностики и контроля состояния естественных и модифицированных магнитосферы, ионосферы и верхней атмосферы [<https://www.laspace.ru/projects/information-systems/arctica-m/>].

В гелиогеофизический аппаратный комплекс ГГЭК-ВЭ входят аппаратура СКИФ-ВЭ (разработана в НИИЯФ МГУ) и спектрометр ГАЛС-ВЭ (разработан в ИПГ Росгидромета).

1.1. Аппаратура СКИФ-ВЭ

В состав аппаратуры СКИФ-ВЭ входят измерительные блоки СКИФ-ВЭ/В и СКИФ-ВЭ/Г (далее – блоки В и Г), предназначенные для контроля радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и обеспечивающие регистрацию на орбите КА *Арктика-М № 1* потоков заряженных частиц (электронов и протонов) в широком интервале энергий от 0.05 кэВ до бо-

лее 160 МэВ. Блоки В и Г установлены во взаимно-перпендикулярных направлениях и дублируют работу друг друга. Каждый из блоков В и Г аппаратуры СКИФ-ВЭ содержит спектрометр энергичной радиации, спектрометры низкоэнергичных электронов и протонов и газоразрядные счетчики Гейгера.

Прибор СЭР (спектрометр энергичной радиации). СЭР – спектрометр телескопической конфигурации – содержит сборку из четырех детекторов *D1–D4*, расположенных на одной продольной оси. Три из них, *D1, D2, D4*, – полупроводниковые (кремниевые) детекторы толщиной 40, 500 и 1000 микрон, соответственно, а *D3* – сцинтиллятор *CsJ* толщиной 10 мм. Логическая система СЭР, работающая на принципе совпадений и антисовпадений электрических импульсов с детекторов с величиной, пропорциональной выделяемой в них энергии пролетающей частицей, формирует несколько энергетических интервалов (каналов) частиц каждого сорта. Логика включает в себя необходимое условие: налетающая частица должна пройти через детектор *D2* с выделением в нем энергии не ниже некоторого порога. Только в этом случае открывается путь для дальнейшей работы логики, и это условие отсекает регистрацию частиц, влетающих вне входного окна спектрометра. Угловые размеры поля регистрации налетающих частиц формируются входным коллиматором и составляют 35°. Информация всех каналов о числе регистраций выдается каждую секунду.

Численное моделирование метрологических характеристик детекторов выполнялось с помощью программного комплекса GEANT4 [24]. Диапазоны измеряемых энергий электронов и протонов СЭР: $E_e = 0.15–10$ МэВ, 6 каналов – П1–П6; $E_p = 2 – 160+$ МэВ, 12 каналов – П7–П18. Энергетические интервалы измерительных каналов электронов и протонов СЭР представлены в табл. 1 и 2.

Спектрометры низкоэнергичных электронов и протонов – электростатические анализаторы (ЭСА) – модули СГМТД-Э и СГМТД-П. В моду-

Таблица 3. Энергетические интервалы ступеней спектров электронов и протонов СГМТД-Э, П

№ ступени	E , кэВ ступени	ΔE , кэВ ступени	№ ступени	E , кэВ ступени	ΔE , кэВ ступени
1	0.15	0.10–0.20	7	4.50	3.40–5.65
2	0.25	0.20–0.30	8	7.50	5.65–9.40
3	0.45	0.35–0.55	9	10.00	7.50–12.50
4	0.80	0.60–1.00	10	13.00	9.75–16.25
5	1.30	1.00–1.60	11	16.00	12.00–20.00
6	2.50	1.90–3.10	12	20.00	15.00–25.00

лях СГМТД-Э,П исследуемые частицы влетают в кольцевой канал анализатора, образуемый частями (сегментами) двух сферических поверхностей, между которыми приложено напряжение, создающее в канале электрическое поле (первый сегментоид). Частицы, прошедшие первый сегментоид, попадают в поле второго такого же сегментоида, но с обратным направлением вектора напряженности электрического поля, а затем во входное окно детектора – вторичного электронного умножителя ВЭУ-7, где регистрируются.

Второй сегментоид необходим для того, чтобы улучшить защищенность модулей от регистрации рассеянного ультрафиолетового излучения Солнца, а также отраженных от внутренних стенок канала потоков заряженных частиц.

Величина напряженности электрического поля в каналах анализатора меняется программным образом, что обеспечивает прохождение по нему частиц различных энергий и, таким образом, регистрацию энергетического спектра. Диапазоны измеряемых энергий:

СГМТД-Э ($E_e = 0.15–20$ кэВ, 12 ступеней – интервалов спектра, $e1–e12$);

СГМТД-П ($E_p = 0.15–20$ кэВ, 12 ступеней – интервалов спектра, $p1–p12$).

Весь энергетический диапазон 0.15–20 кэВ разбит на 12 интервалов со временем регистрации каждого интервала 1 с, т.е. спектр регистрируется за 12 с (табл. 3). Угловые размеры поля регистрации частиц составляют 20° .

Газоразрядные счетчики Гейгера (МИП 1–3). МИП 1 – регистрация интегральных потоков протонов и электронов с энергиями более 800 и 50 кэВ соответственно, торцовый счетчик СБТ-9.

МИП 2 и МИП 3 – регистрация интегральных потоков протонов и электронов с энергиями более 15 МэВ и 800 кэВ, соответственно, всенаправленные счетчики СБМ20 и СИЗ-БГ. Эффективные площади счетчиков СБМ20 и СИЗ-БГ различаются на два порядка, что обеспечивает значительное расширение динамического диапазона регистрации частиц.

Информация счетчиков о числе зарегистрированных частиц выводится один раз в секунду.

1.2. Спектрометр ГАЛС-ВЭ

Спектрометр ГАЛС-ВЭ состоит из двух блоков: ГАЛС-ВЭ/-Ч – со счетчиком Черенкова и ГАЛС-ВЭ/-С – с газоразрядными счетчиками Гейгера (Сг-1–Сг-4).

Счетчик Черенкова предназначен для регистрации потоков протонов с энергиями более 600 МэВ в трех интегральных энергетических диапазонах. Расчетные значения нижних границ диапазонов 600, 800 и 1100 МэВ. Угол регистрации – 4π , расчетная эффективная площадь ~ 40 см².

Четыре счетчика Гейгера с экранами различных толщин регистрируют суммарные потоки электронов и протонов в четырех интегральных энергетических диапазонах.

Основные характеристики счетчиков Гейгера приведены в табл. 4.

Приборы СКИФ-ВЭ и ГАЛС-ВЭ на орбите КА *Арктика-М № 1* функционируют непрерывно.

2. ЦЕНТР ДАННЫХ ОПЕРАТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НИИЯФ МГУ

Центр данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ обеспечивает доступ к оперативным данным космических экспериментов и моделям оперативного прогнозирования явлений космической погоды. Интерактивные приложения ЦДОКМ работают на сайте “Космическая погода” [<https://swx.sinp.msu.ru/>] и предоставляют доступ к данным и моделям в базе данных PostgreSQL. На сайте “Космическая погода” собраны данные, необходимые для оценки и анализа радиационной обстановки не только в ОКП, но и в межпланетной среде, а также уровня солнечной активности. Данные поступают со спутников, наземных станций, центров обработки данных, также в систему загружаются результаты расчетов по моделям. Используется специальное программное обеспечение Satellite Data

Таблица 4. Характеристики счетчиков Гейгера

Счетчик	Нижняя граница диапазона регистрации, МэВ		Толщина экрана, г/см ²	Эффективная площадь и направление (для зон радиационных поясов)
	протонов	электронов		
Сг-1	5.0	0.15	–	0.8 см ² , 2π
Сг-2	15.0	0.7	0.5	
Сг-3	25.0	1.7	1.0	
Сг-4	40.0	4.2	2.3	

Downloading System (SDDS), позволяющее загружать и обрабатывать исходные данные. Сервисы SDDS преобразуют первичные данные, поступающие из разных источников, в единый формат и загружают данные в разные таблицы базы данных (например, параметры солнечного ветра, геомагнитные данные и потоки электронов внешнего радиационного пояса). Одним из преимуществ системы данных ЦДОКМ является возможность извлекать данные из разных источников в виде единого массива временных рядов с разной частотой. Будучи представленными вместе, эти базы данных могут быть использованы для взаимной калибровки измерений, диагностики ошибок в данных, поступающих с разных спутников, и для обеспечения согласованного анализа данных с нескольких спутников.

В качестве ресурса космической погоды интернет-сервис использует данные, поступающие от различных активных космических миссий, таких как *Метеор-М № 2*, *Электро-Л № 2*, *Арктика-М № 1*, *GOES*, *ACE*, *SDO*, *DSCOVR* и другие. Службы данных ЦДОКМ также позволяют получать и анализировать исторические данные, собранные в базе данных ЦДОКМ. Усовершенствованные графические приложения дают возможность проводить сравнительный анализ как экспериментальных данных, так и результатов моделирования. Большая часть рисунков, представленных в данной статье, сделана с помощью инструментов на сайте ЦДОКМ [<https://swx.sinp.msu.ru/constructor2/>].

Оперативные приложения на сайте “Космическая погода” [<https://swx.sinp.msu.ru/>] предоставляют возможность прогноза и построения предыстории радиационной обстановки в ОКП [25]. Эти приложения используют данные с упомянутых выше космических аппаратов, собранные в единую базу данных. Они дают прогноз квазистационарной скорости солнечного ветра на основе анализа изображений Солнца космической обсерваторией SDO/AIA и обеспечивают доступ к нескольким моделям физических условий в околоземном пространстве, включая прогнозы геомагнитных индексов, плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли, положения магнитопаузы в подсолнечной точке, структуры силовых линий маг-

нитосферы Земли, а также прогноз потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение ряда лет НИИЯФ МГУ в сотрудничестве с ИПГ Росгидромета осуществляет мониторинговые наблюдения потоков энергичных частиц и магнитосферной плазмы в околоземном космическом пространстве. Измерения осуществляются на орбитах в широком диапазоне высот: полярные низкоорбитальные спутники серии “Метеор” (~850 км) и геостационарные аппараты серии “Электро” (~36 тыс. км). Данные космических аппаратов используются для диагностики радиационного состояния околоземного космического пространства Центрами космической погоды в ИПГ и НИИЯФ МГУ. Новым шагом в развитии системы радиационного мониторинга стал запуск спутника *Арктика-М № 1* на высокоапогейную эллиптическую орбиту.

Экспериментальная информация с КА *Арктика-М № 1* находится в Центре данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ и в ИПГ. Данные с координатами орбиты КА *Арктика-М № 1* доступны на сайте ЦДОКМ [<https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php?gcm=1>]. Экспериментальные данные по потокам частиц доступны по запросу на электронный адрес: smdc@sinp.msu.ru.

3.1. Радиационные пояса Земли

Потоки энергичных частиц радиационных поясов Земли – основной фактор, создающий угрозу околоземным космическим миссиям. Поэтому мониторинг и прогноз потоков частиц – необходимое условие их радиационной безопасности. Преимуществом орбиты КА *Арктика-М № 1* является возможность подробного исследования радиационных поясов Земли (РПЗ), пролет через сердцевину радиационных поясов.

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и модельных данных по потокам частиц радиационных поясов Земли. Сопоставление данных наблюдения радиации на КА *Арктика-М № 1* приборами СЭР с моделью радиационных поясов

Земли AE8/AP8 [16–17] является хорошим способом проверить адекватность новой аппаратуры, выявить ее особенности, уточнить параметры и калибровки, а также познакомиться с характером магнитосферных явлений, типичных для орбиты типа “Молния”. Необычным, в сравнении с исследовательскими космическими аппаратами, является отсутствие подстройки ориентации КА *Арктика-М № 1* к важному для радиационных наблюдений направлению окружающего магнитного поля; полагалось, что наличие двух разнесенных блоков с сенсорами радиации поможет охватить разные питч-углы.

На рис. 1 представлены данные с двух приборов СЭР, установленных в блоки В и Г аппаратуры СКИФ-ВЭ КА *Арктика-М № 1*, при прохождении КА перигейного участка орбиты, а также результаты моделирования радиации вблизи КА при таком пролете по модели AE8/AP8 [26, 27]. Данные СЭР показаны в панелях 2 и 3 (по 6 каналов для электронов, блоки В и Г соответственно) и 6 и 7 (также по 6 каналов для протонов, в блоках В и Г). Диапазон энергий для электронов 0.15–10 МэВ; графики для меньших энергий, как правило, лежат выше (большая интенсивность потока). Для протонов диапазон энергий 2–160 МэВ, но спектр в возрастных потоках в радиационных поясах не всегда падающий. Данные СЭР показаны как произведение измеренной в канале скорости счета на геометрический фактор прибора, но не как интенсивность потока, т.к. еще остается необходимость уточнения некоторых деталей, а для данного этапа важно убедиться в общем подобии измерений и модели. В панелях 4 и 5 представлены результаты расчета по модели: вдоль орбиты просчитаны дифференциальные по энергии интенсивности потока частиц из полного телесного угла (4π). Питч-угловая анизотропия потоков частиц не была учтена, что, вероятно, и привело к некоторому различию результатов измерений и расчетов. В панели 8 показаны магнитное локальное время *MLT* и параметр *Lm*, рассчитанный по модели поля *IGRF + OPq*. Панель 1 представляет угол в градусах между осью входного окна СЭР и направлением, обратным к вектору геомагнитного поля в точке нахождения КА, для обоих СЭР, стоящих в блоках В и Г. Поле считается также по *IGRF + OPq*. Если угол равен нулю, а КА находится вблизи перигея, то СЭР смотрит вдоль силовой линии к Земле, вослед высыпавшимся частицам. Модельные данные для электронов (панель 4) показывают сильно усредненное возрастание вблизи Земли, на минимальных *L*, – внутренний радиационный пояс, и, на $L > 3$, еще возрастание – внешний радиационный пояс. В модели протонного пояса (панель 5) возрастание только одно. В обоих случаях максимум потока захваченных частиц тем ближе к Земле, чем выше их энергия.

Расположенные над моделью электронных поясов данные об электронах с двух СЭР, как и модель, содержат двугорбую структуру. В левой части панели 3 двугорбость не искажена; в правой части панели 2 и в панели 3 искажения невелики, а в левой части панели 2 они наибольшие. Примечательно, что наибольшие искажения совпадают по времени (пролета – оси абсцисс; в 18.10 UT) с достижением нулевого угла графика направленности СЭР-В (в блоке В и видны основные искажения). Характер искажений – провалы, что соответствует высыпаниям, т.е. невозвратам улетевших к Земле частиц. Данные об электронах с СЭР объясняемы, т.е. адекватны.

Правая часть протонного пояса в панели 6 (блок В) выглядит наиболее схоже с моделью (панель 5). Отличие правой части панели 7 (блок Г) похоже на не очень интенсивное вымывание области под минимумом (19.05 UT) графика направленности СЭР-Г из панели 1. Можно предположить, и что именно вымывание большой интенсивности значительно исказило левую часть радиационного пояса в панели 6 (блок В) из-за поворота СЭР-В точно в конус потерь в 18.10 UT. Крупное отличие от модели есть также в левой части панели 7, с пиком в 18.00 UT, т.е. при направленности СЭР-Г в угол 180° , т.е. вдоль поля. Могут влиять и иные эффекты. Данные о протонах с СЭР также объяснимы и, в этом плане, адекватны.

Данные свидетельствуют об очень существенной питч-угловой анизотропии потоков частиц в приведенном примере (*Dst*-индекс в это время держался на умеренно низком уровне порядка – 30 нТл и варьировал; не показано). Важно, что наблюдаются не только рассмотренные понятные эффекты, но и более мелкие и разные, в разных энергиях, связанные, вероятно, с изменением структуры поля и путей распространения заряженных частиц, с возможным проявлением механизмов ускорения частиц и их потерь. Высокая информационная насыщенность наблюдаемого контрастирует с огрубленным анизотропным усреднением в привлеченной модели РПЗ. В целом, сопоставление измеренного с моделью показало адекватность нового инструмента и доступность новых возможностей.

Магнитная буря 15.I.2022. Магнитная буря может существенно изменить состояние внешнего радиационного пояса. За первый год эксплуатации ИСЗ *Арктика-М № 1* зарегистрированы многочисленные вариации потоков энергичных электронов, связанные с развитием геомагнитных возмущений. Одно из событий произошло в январе 2022 г. Приход к магнитосфере Земли потока высокоскоростного солнечного ветра в условиях южной ориентации межпланетного магнитного поля явился причиной геомагнитной бури, начавшейся 14.I.2022, с максимумом 15.I.2022

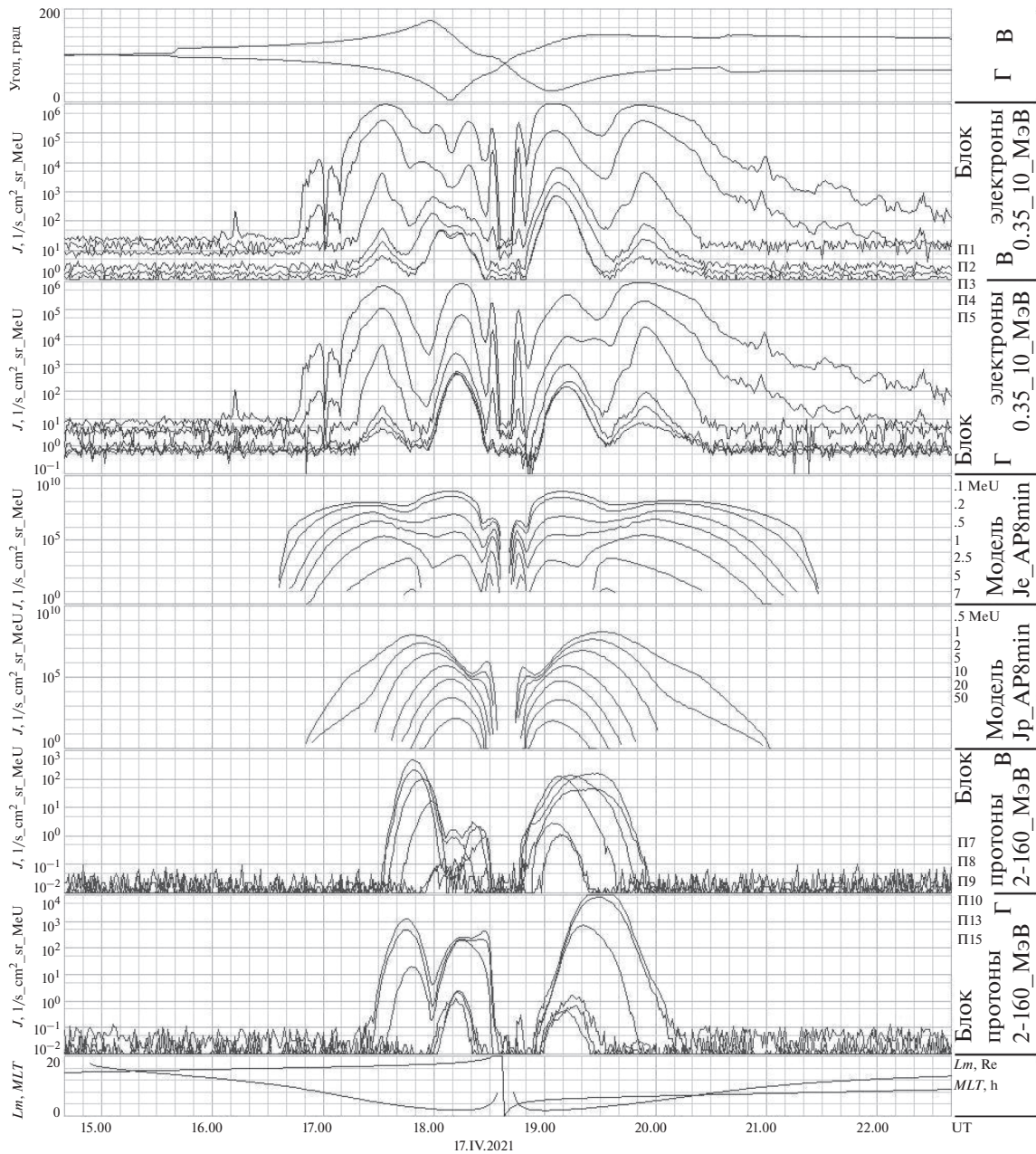


Рис. 1. Измерения дифференциального по энергии потока электронов (панели 2, 3) и протонов (панели 6, 7) прибором СЭР при пролете радиационных поясов Земли КА *Арктика-М № 1* в сравнении со статистическими моделями AE8min и AP8min (панели 4, 5) для периода 14.40–22.40 UT 17.IV.2021. В панели 8 даны L_m и MLT , а в панели 1 – угол оси СЭР (для каждого из двух блоков В и Г) относительно локального геомагнитного поля; за ноль принято направление обратное вектору поля, т.е. вблизи южной полярной шапки нулевой угол означает направленность СЭР вниз, на Землю.

($|Dst|_{max} \sim 90$ нТл – рис. 2). Можно видеть, что на фазе восстановления магнитной бури поток электронов на геостационарной орбите по данным КА “Электро-Л” № 2 (рис. 2в) вырос по сравнению с добуревым уровнем.

Экспериментальные данные с КА *Метеор-М № 2* и *Арктика-М № 1* могут дать представление о динамике потоков частиц во всей области радиационных поясов: данные КА *Метеор-М № 2* только

на высоких широтах, данные КА *Арктика-М № 1* и из сердцевины радиационных поясов на средних широтах (рис. 3). КА *Метеор-М № 2* проходит через область внешнего РПЗ за ~5 мин. При 10 с усреднении данных можно видеть, что в результате геомагнитной бури 14–15.I.2022 поток электронов в РПЗ существенно увеличился (рис. 3а). КА *Арктика-М № 1* проходит через область внешнего РПЗ на среднем участке орбиты при-

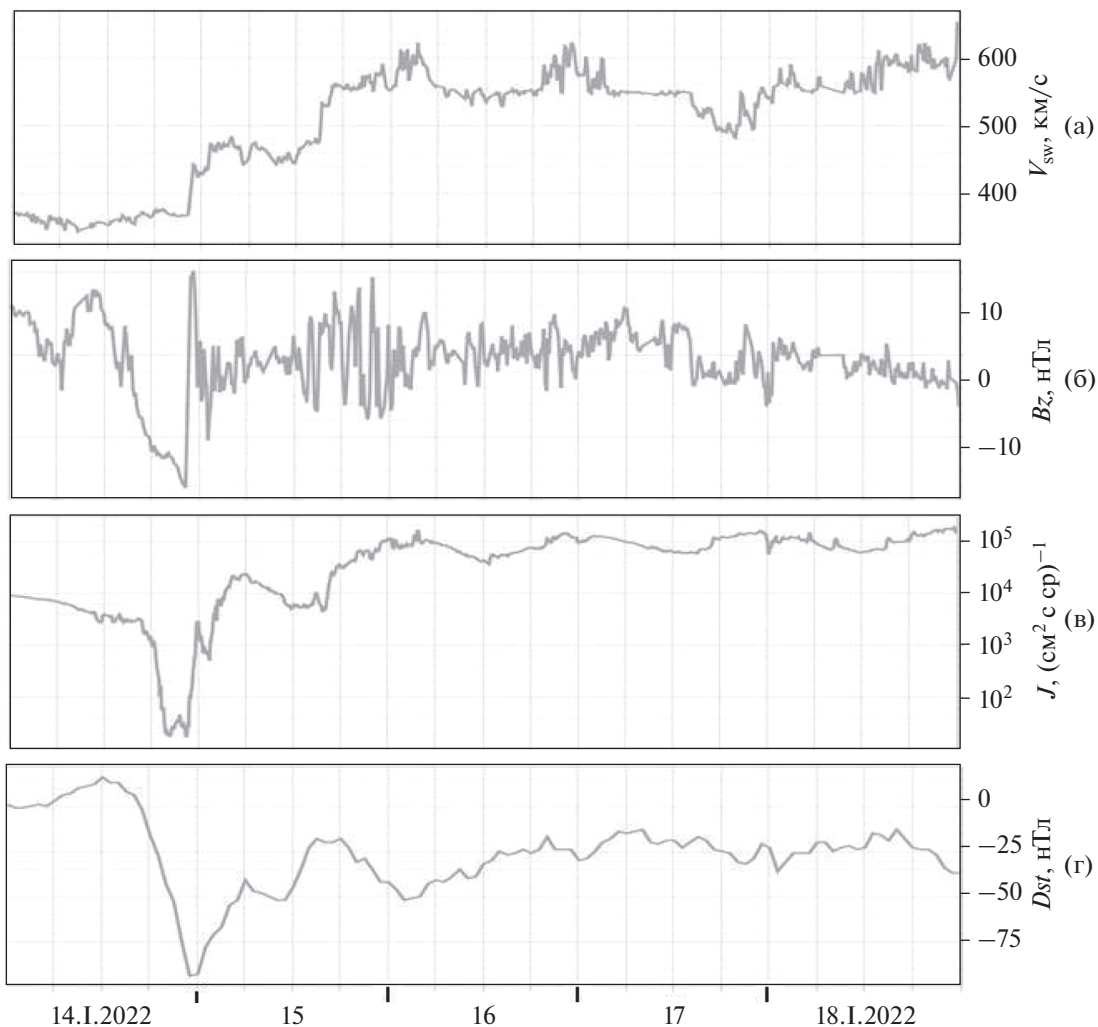


Рис. 2. Временные профили скорости солнечного ветра (а) и B_z -компоненты ММП (б) на орбите Земли, потока электронов с $E > 0.6$ МэВ по данным ИСЗ *Электро-Л* № 2 (в) и Dst -вариации (г) 14–18.1.2022.

мерно за час, что позволяет исследовать его тонкую структуру (рис. 3б). Уже практически на главной фазе бури во внешнем радиационном поясе наблюдается появление потоков электронов с $E = 4–8$ МэВ, которых практически не было до бури (рис. 3б и 3в).

3.2. Солнечное протонное событие 28.X.2021

Наряду с геомагнитными возмущениями, приводящими к вариациям потоков электронов внешнего радиационного пояса, опасность для космических аппаратов представляют солнечные протонные события, сопровождающиеся возрастанием потоков энергичных солнечных протонов в высокоширотной магнитосфере. 28.X.2021 наблюдалось солнечное протонное событие (СПС), которое стало первым GLE-событием (Ground Level Enhancement) 25-ого цикла солнечной активности и 73-м GLE-событием с начала наблю-

дений [<http://gle oulu.fi/#/>]. СПС 28.X.2021 ассоциируется с солнечной вспышкой, произошедшей в 15.17 UT 28.X.2021. Рентгеновский и оптический баллы вспышки – X1.0/2N. Гелиокоординаты вспышки – S26W05, активная область – 12887. Максимальный поток протонов с $E > 10$ МэВ составлял ~ 25 ($\text{cm}^2 \text{с ср})^{-1}$ по данным КА *GOES-16*. Временной профиль потоков солнечных протонов имеет достаточно быструю фазу нарастания и длительную фазу спада потока (рис. 4 и 5). Приборы КА *Meteor-M* № 2 измеряют поток солнечных протонов над полярными шапками Земли. По результатам сравнительного анализа потоков над северной и южной полярными шапками можно судить об анизотропии потока частиц. Можно видеть, что в СПС 28.X.2021 потоки протонов практически изотропны в течение всего события (рис. 4а).

Поток солнечных протонов распространялся в достаточно спокойной межпланетной среде: от-

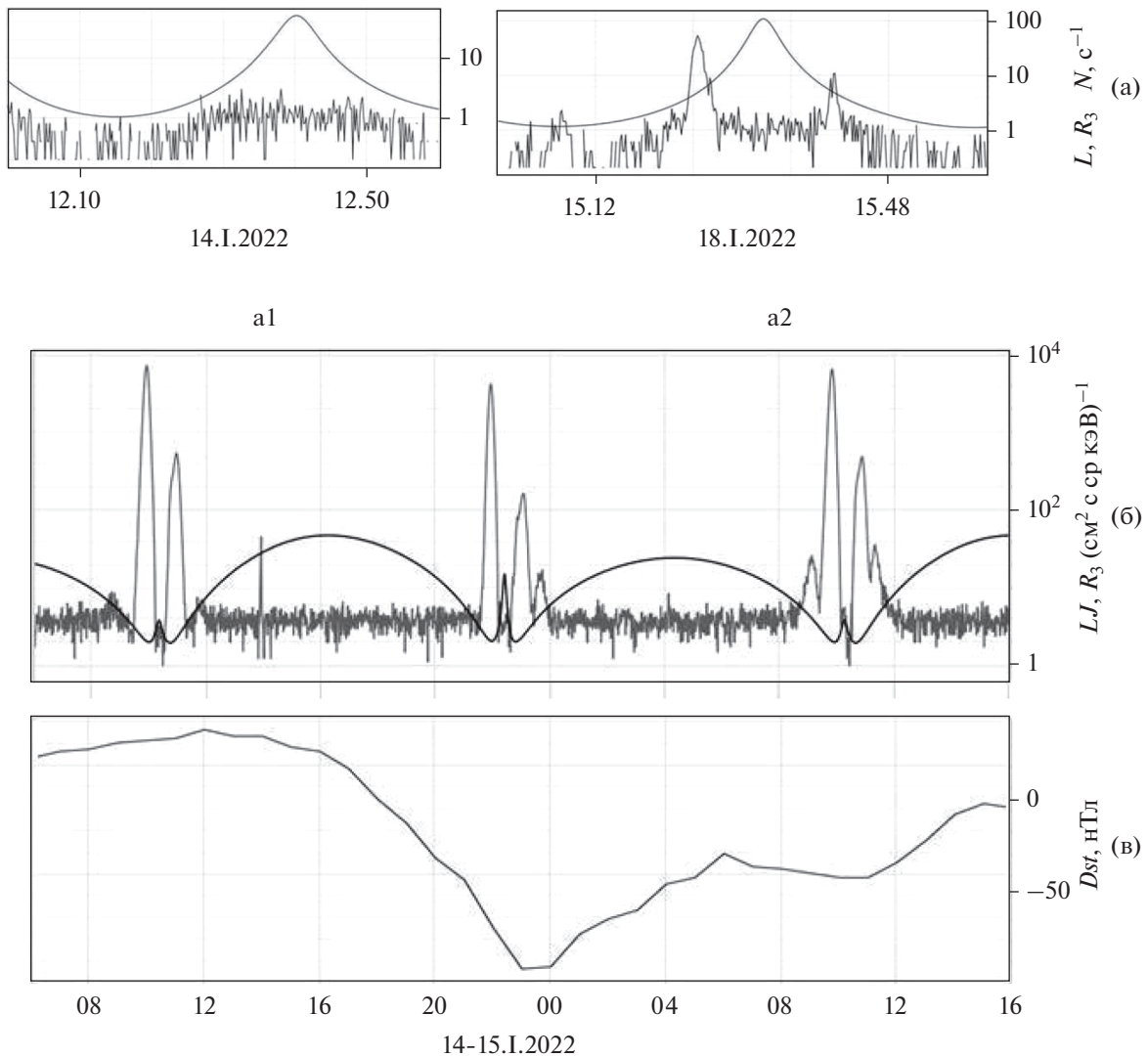


Рис. 3. Временные профили: (а) – потоков электронов с $E > 2$ МэВ по данным КА *Метеор-М № 2* 14.1.2022 (a1) и 18.1.2022 (a2) во время пролета через РПЗ (тонкая линия – L -параметр); (б) – потоков электронов с $E = 4-8$ МэВ по данным КА *Арктика-М № 1* (тонкая линия – L -параметр) и (в) – Dst -вариации с 06.00 14.1.2022 до 16.00 15.1.2022.

носителем медленный солнечный ветер (рис. 4в) и относительно слабое межпланетное магнитное поле (рис. 4г). Но временные профили солнечных протонов и над полярными шапками на открытых силовых линиях геомагнитного поля (данные КА *Метеор-М № 2* – рис. 4а), и проникших в магнитосферу в область геостационарной орбиты (данные КА *Электро-Л № 2* – рис. 4б) имеют особенность 3–4.XI.2021, когда к Земле пришла новая структура межпланетной среды (КВМ – корональный выброс массы) с ударной волной, высокоскоростным солнечным ветром и сильным магнитным полем (рис. 4в и 4г). Данные КА *Метеор-М № 2* наглядно демонстрируют повышенную концентрацию потока протонов перед ударной волной (рис. 4а), а по данным КА *Электро-Л № 2* можно видеть реакцию геомагнитного поля, вы-

раженную в вариациях частиц, на воздействие ударной волны на магнитосферу Земли.

СПС 28.X.2021 – GLE-событие, и, следовательно, в ОКП пришел поток высокоэнергичных солнечных частиц, что зарегистрировано и в полярных шапках на КА *Метеор-М № 2* (рис. 5а) и внутри магнитосферы на КА *Арктика-М № 1* (рис. 5б). Кривые на рис. 5 соответствуют потокам солнечных протонов с указанными энергиями: от $E > 1$ МэВ до $E > 800$ МэВ.

Экспериментальные данные по потокам солнечных энергичных частиц с научных приборов, установленных на *Метеор-М № 2* и на КА *Арктика-М № 1* дают возможность исследования СПС в очень широком интервале энергий, построения подробного энергетического спектра потоков солнечных протонов. Для СПС 28.X.2021 был по-

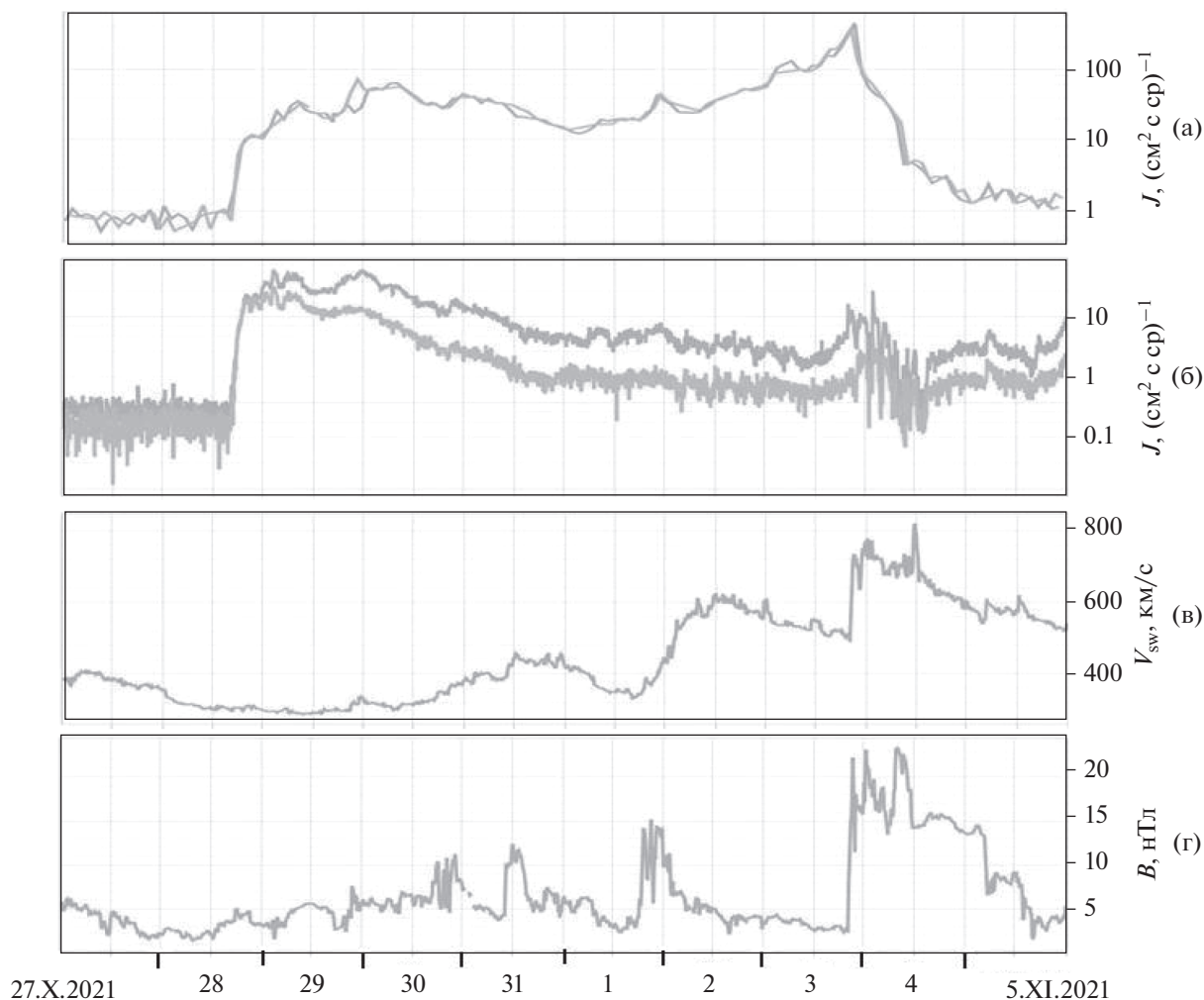


Рис. 4. Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА *Метеор-М* № 2 с $E = 3\text{--}10$ МэВ над северной и южной полярными шапками (а) и по данным КА *Электро-Л* № 2 с $E = 9\text{--}20$ МэВ и $E = 20\text{--}40$ МэВ (б), скорости солнечного ветра (в) и модуля межпланетного магнитного поля (г) 27.X–5.XI.2021.

строен энергетический спектр максимумов потоков солнечных протонов по экспериментальным данным всех имеющихся КА (рис. 6). Спектр был аппроксимирован во всем диапазоне энергий функцией:

$$J(E) = J_0 E^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right).$$

Параметры γ и E_0 определялись методом наименьших квадратов: $\gamma = 0.511$, $E_0 = 228$ кэВ. Понятие энергетического спектра протонов в максимуме события было введено исторически, когда предполагались практически мгновенная инжекция солнечных частиц в межпланетное пространство и дальнейшее распространение их путем диффузии. В этом случае спектр в максимуме отражает спектр частиц, ускоренных на Солнце. Развитие представлений об ускорении и распространении солнечных частиц привело к сценари-

ям, в которых рассматривается длительное и/или многократное ускорение и сложная картина распространения частиц в короне Солнца и в межпланетной среде с учетом геометрии магнитного поля. Принимаются во внимание диффузия, конвекция, адиабатическое охлаждение, а также дрейф частиц. Безусловно, все эти факторы могут влиять на поток частиц в максимуме события и нередко приводят к наличию плоского максимума или двух–трех максимумов. Тем не менее, спектр в максимуме по-прежнему является одной из главных характеристик события, так как дает представление о первом, зачастую наиболее мощном, этапе энергетического выделения на Солнце. На рис. 6 также представлены уменьшенные в 10 раз потоки галактических космических лучей (ГКЛ) для периода максимума солнечной активности по ГОСТ 25645.150-90. Пересечение спектра частиц СПС и ГКЛ – это квазимаксимальная энергия –

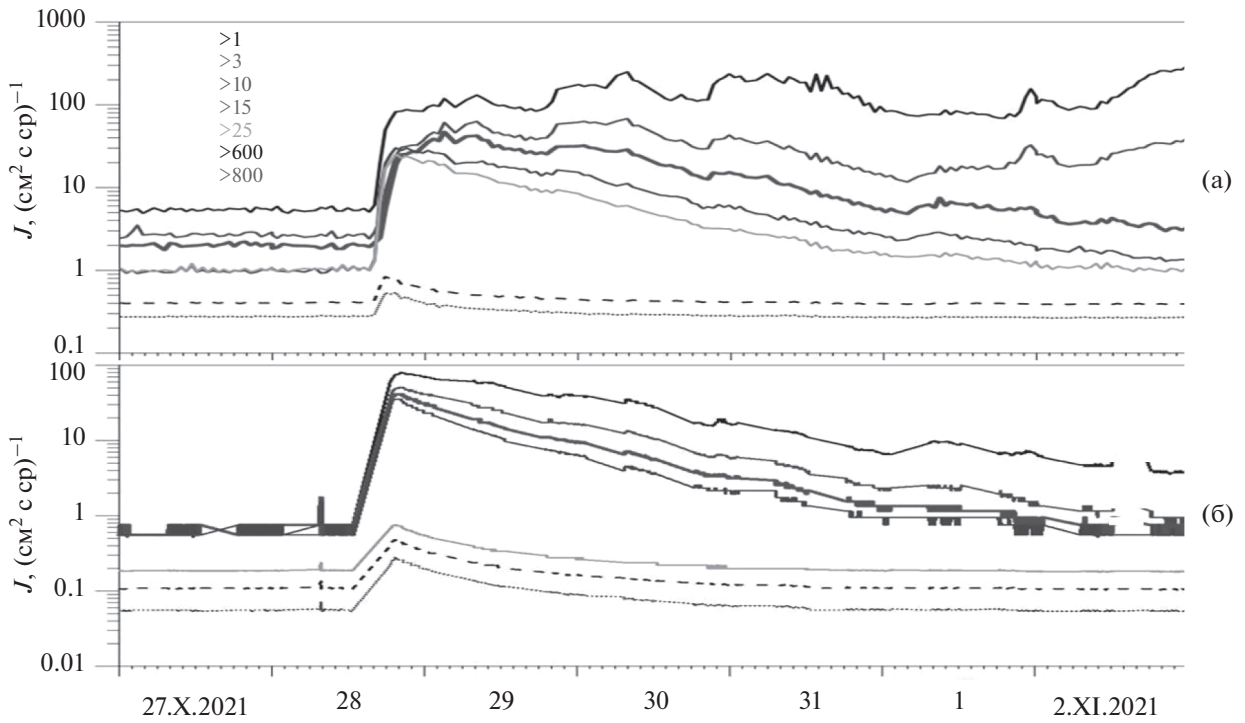


Рис. 5. Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА Метеор-М № 2 (а) и КА Арктика-М № 1 (б) с 27.X по 2.XI.2021 (см. текст).

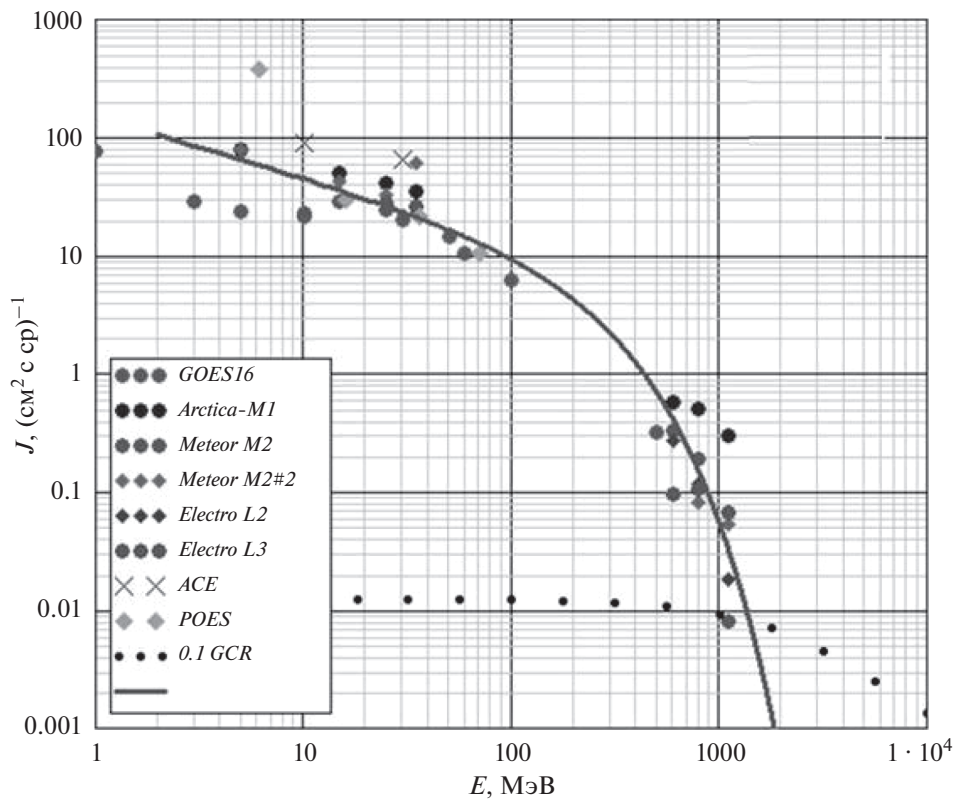


Рис. 6. Энергетический спектр максимумов потоков солнечных протонов 28.X.2021.

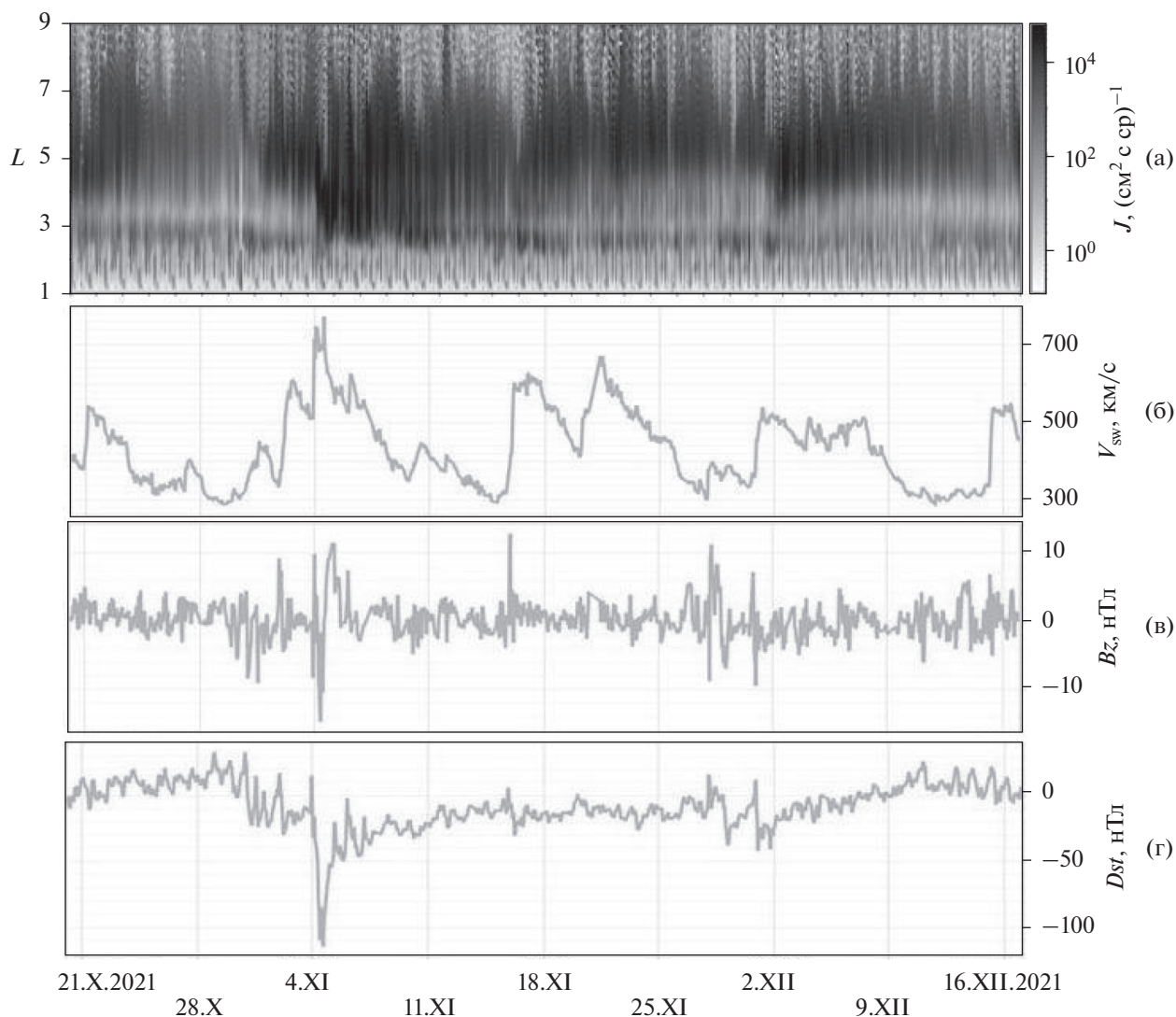


Рис. 7. 20.X–16.XII.2021: Временная зависимость радиального распределения потоков электронов с $E > 0.1$ МэВ в РПЗ по данным КА *Метеор-М № 2* (а); Временные профили: скорости солнечного ветра (б), B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (в) и Dst -вариации (г).

первое приближение к реальной максимальной энергии наблюдаемых потоков протонов в данном солнечном событии [28].

3.3. Исследование космической плазмы

Исследования воздействия космической среды на материалы и элементы оборудования космических аппаратов начаты в НИИЯФ МГУ практически с начала космической эры (например, [4]), а космической плазмы — с запуска первых геостационарных спутников (например, [29]). Со спектрометров низкоэнергичных электронов и протонов, установленных на КА *Арктика-М № 1*, так же, как и на КА *Метеор-М № 2* и на КА *Электро-Л № 2*, получен большой объем ин-

формации, но это — материал для дальнейших исследований и для другой публикации.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Основными задачами мониторинга являются: оценка и прогноз радиационных условий в ОКП, апробация и уточнение существующих и разработка новых динамических моделей радиационных полей, получение экспериментальных данных для решения ключевых проблем физики космоса. КА *Арктика-М № 1* из-за особенностей орбиты подвержен сильно воздействию факторов внешней среды, так как пересекает все основные структурные области внутренней магнитосферы: внутренний и внешний электронные радиационные пояса, авроральную зону и по-

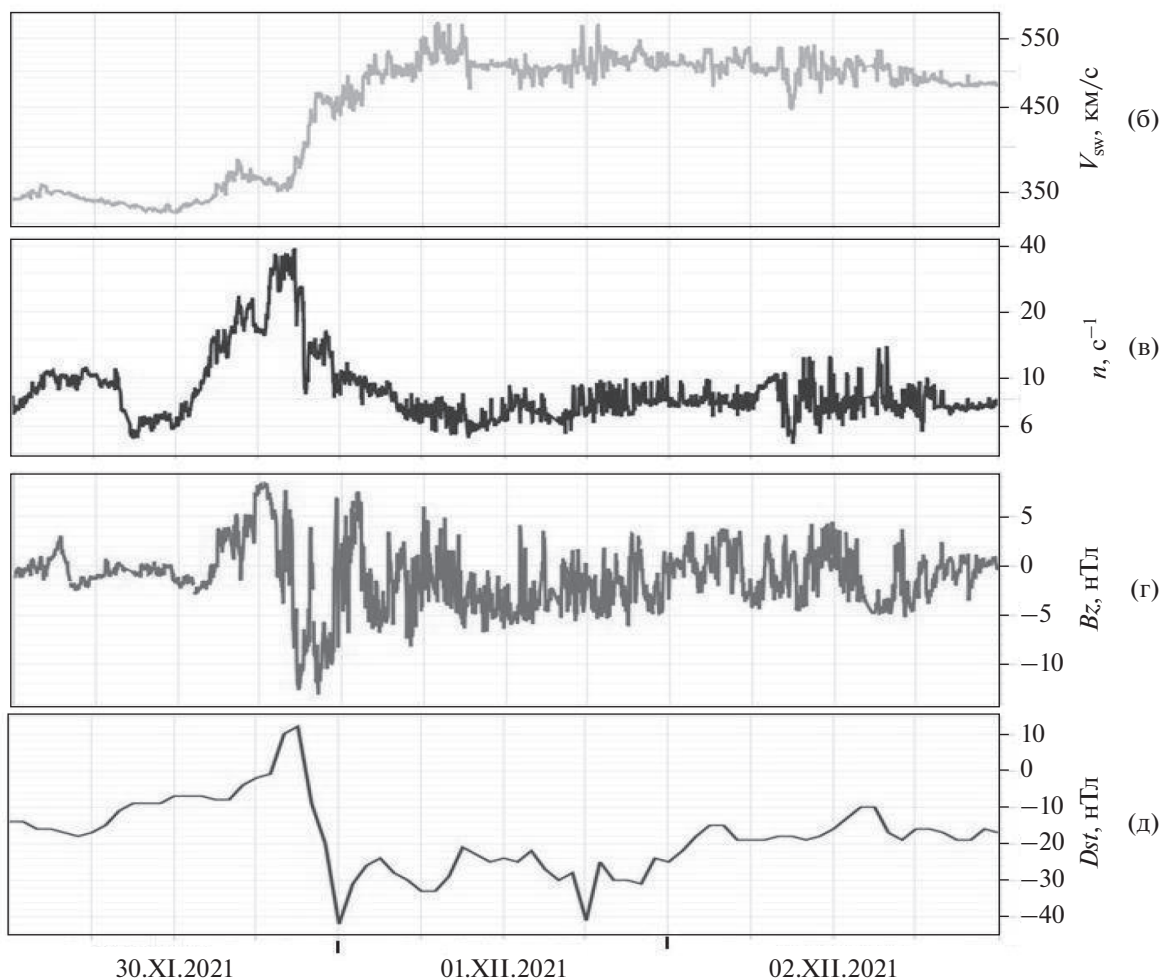
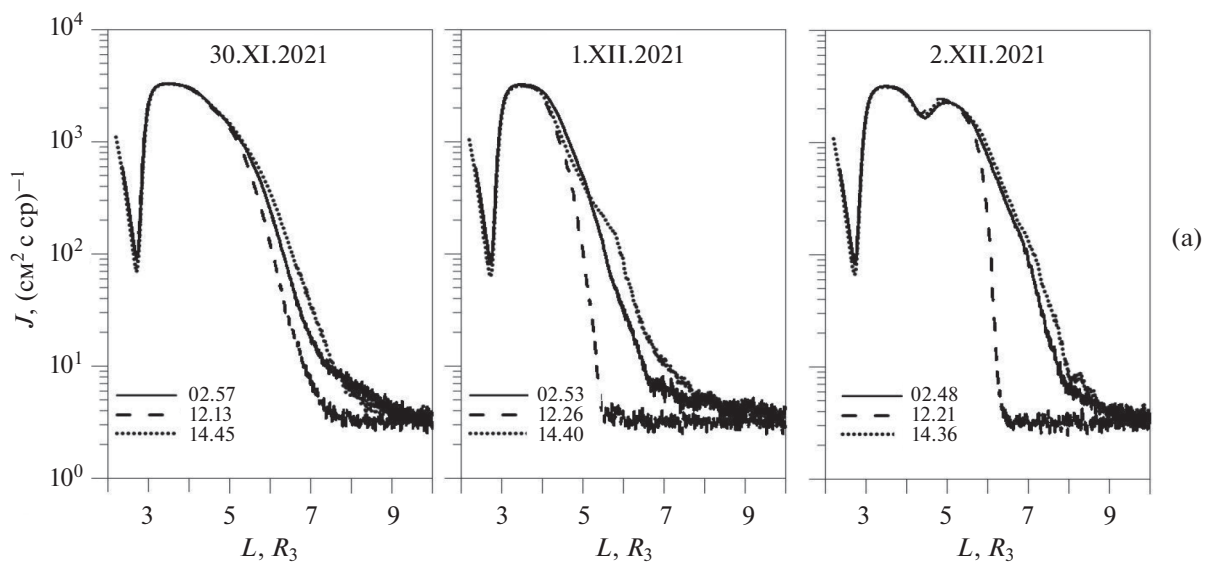


Рис. 8. Радиальные профили потоков электронов с $E > 0.7$ МэВ по данным КА *Арктика-М2* № 1 30.XI, 1.XII и 2.XII.2021 (а); Временные профили 30.XI–2.XII.2021: скорости (б) и плотности (в) солнечного ветра, B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (г) и Dst -вариации (д).

лярные шапки, и именно поэтому экспериментальные данные, полученные с КА *Арктика-М № 1*, могут дать новую интересную информацию о радиационных полях в этих областях. На примере СПС 28.X.2021 можно видеть, что потоки солнечных энергичных частиц могут возрасти за небольшое время на несколько порядков величины. Потоки электронов во внешнем радиационном поясе также могут испытывать быстрые и сильные вариации. На временной зависимости радиального распределения потоков электронов внешнего радиационного пояса (рис. 7а) можно видеть изменение структуры и интенсивности пояса, как следствие от воздействия на магнитосферу межпланетной среды (рис. 7б и 7в) и развития геомагнитных возмущений (рис. 7г) 20.X–16.XII.2021.

Интересную, не часто встречающуюся, структуру электронных радиационных поясов с тремя максимумами, появившуюся после слабой геомагнитной бури ($Dst_{\max} \sim 40$ нТл) 30.XI–2.XII.2021, можно видеть по данным КА *Арктика-М № 1* (рис. 8а). Цифры на рисунках – время (UT) прохождения КА через $L = 4$, область, где чаще всего располагается максимум внешнего радиационного пояса. Трехмаксимумные структуры радиационных поясов были обнаружены в эксперименте на двух КА *Van Allen Probes*, эллиптическая орбита которых находилась вблизи плоскости экватора (например, [30]). Орбита КА *Арктика-М № 1* тоже позволяет проводить подобные исследования. Событие 30.XI–2.XII.2021 интересно тем, что буря была слабая, но геомагнитная возмущенность продолжительная. Эффект “третьего радиационного пояса” возник в результате совокупного действия основных факторов межпланетной среды на магнитосферу Земли: скорости (рис. 8б) и плотности (рис. 8в) солнечного ветра, V_z -компоненты межпланетного магнитного поля (рис. 8г). Ответную реакцию магнитосферы на воздействие межпланетной среды можно видеть по Dst -вариации (рис. 8д). Подробный анализ данного события – предмет дальнейшей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оперативный мониторинг радиационных условий на разных орбитах в околоземном космическом пространстве наиболее важный и, пожалуй, единственный инструмент для обеспечения радиационной безопасности космических миссий и создания прогноза космической погоды. Динамика потоков ионизирующих излучений как в межпланетном пространстве, так и в магнитосфере такова, что интенсивности потоков в течение небольшого времени могут изменяться на несколько порядков величин, поэтому усредненные эмпирические модели радиационных поясов не всегда могут быть полезны для оценки радиаци-

онных условий на конкретных орбитах. Следует также отметить, что методов долгосрочного и среднесрочного прогноза вспышек и солнечных протонных событий в настоящее время не существует. Единственным способом предупреждения их опасных воздействий является своевременное сообщение о возрастании потоков заряженных частиц, что требует непрерывного их измерения.

Получение большого объема регулярных мониторинговых данных о радиационной обстановке в околоземном космическом пространстве на базе многоярусных измерений на разных орбитах позволяет изучать ее кратко- и средневременную динамику, ее связь с солнечной активностью, и является необходимым условием для восстановления трехмерной динамической картины радиации в магнитосфере. Существуют хорошие предпосылки для осуществления космического радиационного мониторинга отечественными космическими аппаратами: серий *Электро*, *Метеор*, *Арктика*, а также планируемые миссиями: “Ионосфера”, “Кубсаты” (проект МГУ “Универсат-Сократ”).

Данные по геомагнитному индексу получены в World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto. Экспериментальные данные измерений КА *ACE*, *DISCOVER*, *GOES*, *POES* получены в NASA/GSFC Space Physics Data Facility (SPDF), CDAWeb (the Coordinated Data Analysis Web) (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>).

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект “Ядерная и радиационная физика”).

Конфликт интересов: автор В.В. Калегаев является членом редколлегии журнала “Космические исследования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупников К.К., Марьян Б.В., Милеев В.Н. и др. Анализ эффектов электризации геостационарных ИСЗ “Горизонт” и “Электро” по данным бортовых спектрометров горячей магнитосферной плазмы // Космонавтика и ракетостроение. 2003. Т. 1. № 30. С. 156–161.
2. Cole D.G. Space Weather: Its Effects and Predictability // Advances in Space Environment Research 2003. V. 1. P. 295–302.
3. Romanova N.V., Pilipenko V.A., Yagova N.V., Belov A.V. Statistical correlation of the rate of failures on geosynchronous satellites with fluxes of energetic electrons and protons // Cosmic Research. 2005. V. 43. № 3. P. 179–185.
4. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой. М.: КДУ, 2021.
5. Vernov S.N., Chudakov A.E. Investigations of cosmic radiation and of the terrestrial corpuscular radiation by

- means of rockets and satellites // *Physics-Uspekhi*. 1960. V. 3. № 2. P. 230–250.
6. *Van Allen J.A.* The geomagnetically trapped corpuscular radiation // *J. Geophys. Res.* 1959. V. 64. № 11. P. 1683–1689.
 7. *Baker D.N., Panasyuk M.I.* Discovering Earth's radiation belts // *Physics Today*. 2017. V. 70. № 12. P. 46–51.
 8. *Vernov S.N., Chudakov A.E., Vakulov P.V., Logachev Yu.I.* Radiation measurement during the flight of the second Soviet space rocket. Proc. First International Space Science Symposium (Space Research). Amsterdam: North-Holland. 1960. P. 845–851.
 9. *Вернов С.Н., Кузнецов С.Н., Логачев Ю.И. и др.* Радиальная диффузия электронов с энергией больше 100 кэВ во внешнем радиационном поясе // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1968. Т. 8. № 3. С. 401–411.
 10. *Панасюк М.И. и др.* Модель космоса. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007.
 11. *Тверской Б.А.* Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968. (Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М.: УРСС. 2004. 336 с.)
 12. *Panasyuk M.I., Fritz T.A., Spjeldvik W.N.* Dominant fluxes of trapped MeV heavy-ions in equatorial radiation belts – comparison of soviet and American experiments // *EOS. Transactions. American Geophysical Union*. 1978. V. 59. № 4. P. 348–348.
 13. *Власова Н.А., Горчаков Е.В., Иванова Т.А. и др.* Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на Российских космических аппаратах связи, навигации и телевидения // *Космич. исслед.* 1999. Т. 37. № 3. С. 245–255.
 14. *Балашов С.В., Иванов В.В., Максимов И.А. и др.* Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных космических аппаратах // *Космонавтика и ракетостроение*. 2003. Т. 30. № 1. С. 95–101.
 15. *Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др.* Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. № 6. С. 461–468. <https://doi.org/10.7868/S0023420615060047>
 16. *Sawer D.M., Vette J.L.* AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum. Report NSSDC/SDC-A-R&S76-06. NASA GSFC. 1976.
 17. *Vette J.L.* The AE8 Trapped Electron Model Environment. NSSDC WDC-A-R&S91-24. NASA GSFC. 1991.
 18. *Гецелев И.В., Гусев А.Н., Дарчиева Л.А. и др.* Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли (Модель НИИЯФ-91). Москва: Препринт НИИЯФ МГУ-91-37/241, 1991.
 19. *Ginet G.P., O'Brien T.P., Huston S.L. et al.* AE9, AP9 and SPM: new models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 179. № 1–4. P. 579–615.
 20. *Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др.* Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). М.: МЦД, 2022.
 21. Method of the solar energetic protons fluences and peak fluxes determination. ISO/TR 18147. Space environment (natural and artificial). 2014.
 22. *Crane L.* Predicting space weather, protecting satellites // *Eos*. 2016. V. 97. <https://doi.org/10.1029/2016EO056621>
 23. *Chen Y., Reeves G.D., Fu X., Henderson M.* PreMeV-E: New predictive model for mega-electron-volt electrons inside Earth's outer radiation belt // *Space Weather*. 2019. V. 17. № 3. P. 438–454. <https://doi.org/10.1029/2018SW002095>
 24. *Agostinelli S., Allison J., Forti A. et al.* GEANT4 – a simulation toolkit // *Nuclear instruments and methods in physics research*. 2003. V. 506. № 3. P. 250. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
 25. *Kalegaev V., Panasyuk M., Myagkova I. et al.* Monitoring, analysis and post-casting of the Earth's particle radiation environment during February 14–March 5, 2014 // *J. Space Weather and Space Climate*. 2019. V. 9. P. A29. <https://doi.org/10.1051/swsc/2019029>
 26. *Daly E.L., Lemaire J., Heynderickx D., Rodgers D.J.* Problems with models of the radiation belts // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1996. V. 43. № 2. <https://doi.org/10.1109/23.490889>
 27. *Boscher D., Bourdarie S., O'Brien P., Guild T.* IRBEM library. 2004–2008.
 28. *Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Дайбог Е.И. и др.* Новый параметр в описании событий СКЛ – энергия баланса между солнечными и галактическими протонами // *Ядерная Физика*. 2018. Т. 81. № 3. С. 371–376. <https://doi.org/10.7868/S0044002718030121>
 29. *Сосновец Э.Н., Ковтюх А.С., Тельцов М.В. и др.* Исследование динамики магнитосферных плазменных доменов по данным измерений горячей плазмы и энергичных частиц радиационных поясов Земли // *Информационный бюллетень РФФИ*. 1999. Т. 7. № 2. С. 131.
 30. *Li Y.-X., Yue C., Hao Y.-X. et al.* The characteristics of three-belt structure of sub-MeV electrons in the radiation belts // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021. V. 126. P. e2021JA029385. <https://doi.org/10.1029/2021JA029385>