
**МОНИТОРИНГ ЯВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ НАНОСПУТНИКОВ
«СОЗВЕЗДИЕ-270» МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА****MONITORING OF SPACE WEATHER EFFECTS WITH
SOZVEZDIE-270 NANOSATELLITE CONSTELLATION
OF MOSCOW UNIVERSITY**

А.В. Богомолов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, aabboogg@srd.sinp.msu.ru

В.В. Богомолов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, bogovit@rambler.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

А.Ф. Иудин

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, aiyyudin@srd.sinp.msu.ru

В.В. Калегасев

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, klg@dec1.sinp.msu.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

И.Н. Мягкова

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

В.И. Оседло

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, osedlo@mail.ru

С.И. Свертилов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, sis@coronas.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

И.В. Яшин

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Москва, Россия, ivn@eas.sinp.msu.ru

A.V. Bogomolov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, aabboogg@srd.sinp.msu.ru

V.V. Bogomolov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, bogovit@rambler.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

A.F. Iyudin

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, aiyyudin@srd.sinp.msu.ru

V.V. Kalegaev

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, klg@dec1.sinp.msu.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

I.N. Myagkova

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, irina@srd.sinp.msu.ru

V.I. Osedlo

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, osedlo@mail.ru

S.I. Svertilov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, sis@coronas.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

I.V. Yashin

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, ivn@eas.sinp.msu.ru

Аннотация. В настоящее время реализуется космический проект «Созвездие-270» Московского университета. Он подразумевает развертывание группировки наноспутников формата кубсат. К настоящему времени запущено 20 спутников, 9 из них продолжают функционировать на околоземной орбите, в ближайшее время будет запущен еще один. Специально для использования в экспериментах на борту малых космических аппаратов формата кубсат разработаны

Abstract. The space project Sozvezdie-270 of Moscow University is in progress now. It involves the deployment of a CubeSat nanosatellites constellation. To the present, 20 satellites have been launched, 9 of them continue to function in near-Earth orbit; one more will be launched in the near future. Instruments were developed specifically for the experiments on board small spacecraft of the CubeSat format, which provide measurements of fluxes and spectra of charged particles, primarily

приборы, обеспечивающие измерения потоков и спектров заряженных частиц, — в первую очередь, электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, а также гамма-квантов. Наряду с космической группировкой создается сеть наземных приемных станций. Многоспутниковая группировка дает ряд преимуществ при изучении динамических процессов в околоземном космическом пространстве. В частности, она позволяет проводить одновременные измерения потоков заряженных частиц с использованием однотипных приборов в разных точках околоземного космического пространства. Такие измерения дают уникальную информацию о потоке субрелятивистских электронов, включая изменения, обусловленные высыпаниями электронов, что имеет большое значение для понимания механизмов ускорения и потерь захваченных и квазизахваченных электронов радиационных поясов Земли (РПЗ).

Обсуждаются различные недавние проявления космической погоды, связанные с повышенной вспышечной активностью Солнца. Среди таких эффектов — заполнение полярных шапок частицами солнечных космических лучей, динамические процессы во внешнем РПЗ во время магнитных бурь, быстрые изменения потоков электронов из-за высыпаний.

Ключевые слова: космическая погода, радиационные пояса Земли, солнечные космические лучи, наноспутники, кубсат.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода — сравнительно молодой раздел современной физики, изучающий крайне изменчивые условия в околоземном космическом пространстве (ОКП). Эти изменения обусловлены активными процессами на Солнце, условиями в межпланетной среде (вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ)) и в системе магнитосфера—ионосфера—термосфера, а также их влиянием на Землю и деятельность человека. Неблагоприятные изменения в ОКП могут снизить производительность и надежность космических аппаратов и наземных систем, что, в свою очередь, может повлечь за собой крупные потери из-за проблем в работе систем связи, навигации, энергосистем и разведывательных спутников [Baker, 2001; Белов и др., 2004; Iucci et al., 2005; Романова и др., 2005; Potapov et al., 2016; Новиков, Воронина, 2021]. Вот почему космическая погода (КП) стала одной из самых быстроразвивающихся областей исследования за последние несколько десятилетий [Daglis, 2001; Cole, 2003; Schrijver et al., 2015; McGranaghan et al., 2021]. Сегодня центры космических прогнозов были созданы несколькими национальными правительствами и академическими институтами (например, [Wei et al., 2003; Lundstedt, 2006; Wilkinson, 2009]).

Одним из основных проявлений КП являются вариации потоков энергичных заряженных частиц в различных областях ОКП [Kudela, 2013]. При этом регистрируемые приборами вариации потоков частиц

электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, а также гамма-квантов. Along with the space constellation, a network of ground receiving stations is also being created. A multi-satellite constellation gives a number of advantages in studying dynamic processes in near-Earth space. In particular, it makes possible to carry out simultaneous measurements of charged particle fluxes with instruments of the same type at different points in near-Earth space. Such measurements provide unique information about the flux of sub-relativistic electrons, including variations due to precipitation of electrons, which is of great importance for understanding the mechanisms of acceleration and losses of trapped and quasi-trapped electrons in Earth's radiation belts (ERB).

We discuss various recent space weather manifestations associated with increased solar flare activity. Among such effects is the filling of the polar caps with particles of solar cosmic rays, dynamic processes in outer ERB during magnetic storms, rapid variations in electron fluxes due to precipitation.

Keywords: space weather, Earth's radiation belts, solar cosmic rays, nanosatellites, CubeSat.

и квантов могут быть вызваны как пересечением спутником компактной области с повышенной концентрацией частиц (так называемые пространственные эффекты), так и ростом (или уменьшением) интенсивности (временные эффекты). В свою очередь, и пространственные, и временные эффекты могут быть связаны как с ускорением частиц, так и с их высыпанием из областей захваченного излучения — радиационных поясов Земли (РПЗ), а также с проникновением в магнитосферу частиц, ускоренных во вспышках на Солнце, т. е. так называемых солнечных космических лучей (СКЛ) [Дорман, Миросниченко, 1968].

Экспериментальные измерения потоков энергичных заряженных частиц в ОКП начались в первые годы космической эры [Вернов и др., 1958]. На основе этих измерений в 1970–80-х гг. были разработаны эмпирические модели РПЗ. Эти модели описывают пространственное и энергетическое распределение всенаправленных потоков протонов с энергиями от сотен килоэлектронвольт до сотен мегаэлектронвольт и электронов с энергиями от десятков килоэлектронвольт до ~7–10 МэВ в большой области ОКП от высот ~250 км до геостационарных и высокоэллиптических орбит. Наиболее известны модели AP8, AE8 (США), а также модели AP9/AE9 [Ginet et al., 2013], основанные на более новых экспериментальных данных. В НИИЯФ МГУ также разработаны модели РПЗ [Кузнецов и др., 2014], которые легли в основу отечественных стандартов, регламентирующих методы оценки радиационных условий полета спутников.

Однако эти модели являются стационарными. Вариации потоков частиц отражаются в них лишь заданием потоков для эпох минимальной и максимальной солнечной активности, при этом соответствующие значения потоков различаются лишь для некоторых энергий максимум в несколько раз. В то же время реальные потоки заряженных частиц в окрестности Земли даже в геомагнитно-спокойных условиях испытывают весьма существенные средние- и долгосрочные вариации, связанные с солнечной и геомагнитной активностью, изменениями магнитного поля Земли и плотности верхней атмосферы. Необходимо также обратить внимание на быстрые вариации потоков космического излучения, к которым, в первую очередь, относятся кратковременные (с характерными временами менее нескольких секунд) вариации потоков электронов субрелятивистских и релятивистских энергий (от сотен килоэлектронвольт до ~ 10 МэВ).

Для построения адекватной динамической картины трехмерного распределения потоков энергичного излучения в ОКП необходимо учитывать их временные изменения, в том числе кратковременные вариации потоков высокоэнергичных электронов. При этом центральной задачей является выявление того, являются ли обнаруженные вариации потоков частиц следствием пространственных или временных эффектов. Эту задачу трудно решить с помощью одного космического аппарата (КА). Для этого необходимы одновременные измерения на нескольких КА, что может быть реализовано с помощью многоспутниковой группировки. Наиболее эффективно такие задачи решаются путем сравнительного анализа данных нескольких КА, работающих как на близких, так и на существенно разных орбитах. Реализация такой стратегии может включать следующие варианты:

1) последовательное прохождение одной и той же области близкорасположенными спутниками, что позволит наиболее надежно разделить пространственные и временные эффекты;

2) одновременные измерения на разных L-оболочках, что необходимо для восстановления динамической картины распределения потока захваченных частиц в широком диапазоне орбит, что, в частности, позволит наблюдать смещение максимума РПЗ во время геомагнитных возмущений;

3) одновременные измерения на одной высоте однотипными приборами, расположенными на нескольких спутниках, смещенных по долготе друг относительно друга, что позволит оценить влияние фактора локального времени на динамику потока частиц.

Часть этих задач может быть решена группировкой нескольких одновременно запускаемых КА с идентичными детекторами на борту, другая часть — анализом данных одного или нескольких наноспутников совместно с данными более крупного КА, оснащенного комплексом приборов, обеспечивающим детальные измерения потоков частиц, электромагнитного поля и других параметров магнитосферной плазмы. Представляется, что микро- и наноспутники стандартного формата, включая кубсаты, являются

наиболее подходящими КА для реализации рассматриваемой стратегии многоспутниковых измерений. Такие аппараты относительно дешевы, не требуют сложных этапов разработки и специальных испытаний. Как правило, их вывод на орбиту осуществляется методом попутного запуска, что также серьезно снижает стоимость миссии. При этом нет необходимости полностью дублировать функционал крупных КА. Преимущество группировки микро- и наноспутников заключается как раз в возможности более детального изучения временных вариаций различных компонент космического излучения в различных областях ОКП [Caspi et al., 2022].

1. МНОГОСПУТНИКОВАЯ МИССИЯ «СОЗВЕЗДИЕ-270» МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

В последние годы Московский государственный университет реализует собственную космическую программу, в ходе которой ведется мониторинг потоков заряженных частиц в ОКП, а также солнечного рентгеновского и гамма-излучения — электромагнитных транзиев различной природы. В этой связи следует отметить успешный запуск спутников «Университетский—Татьяна» [Садовничий и др., 2011], «Университетский—Татьяна-2» [Садовничий и др., 2011], «Вернов» [Панасюк и др., 2016а, б], «Ломоносов» [Sadovnichii et al., 2017]. Следующим шагом в этом направлении является новый проект «Созвездие-270» Московского университета, предусматривающий развертывание группировки наноспутников. На конец 2024 г. запущено 20 наноспутников формата кубсат (начиная с 2018 г.), 9 из которых продолжают работать на полярной орбите на высоте ~ 500 км. Среди них КА «Авион», запущенный 27 июня 2023 г., позволивший получить максимальный объем научных данных.

На сегодняшний день развернутая в рамках проекта «Созвездие-270» группировка спутников работает в режиме наблюдения отдельных событий, однако в перспективе предполагается ее наращивание, а также создание сети приемных станций, распределенных по меридианам, что позволит оперативно получать большие объемы данных и тем самым перейти к мониторингу космической радиации в режиме близком к реальному времени. В этом плане не менее пяти наземных приемных станций должны быть развернуты с использованием антенн, работающих в диапазонах VHF, S и X в регионах от Калининграда до Камчатки. В результате будет создана единая система, состоящая из космического и наземного сегментов, которая должна обеспечить управление КА, а также регулярный прием данных со спутников группировки, расположенных в разных точках ОКП, что существенно увеличит объем передаваемой информации. Основной целью многоспутниковой группировки является мониторинг космического излучения и электромагнитных транзиев различной природы: атмосферного, астрофизического и солнечного происхождения.

Для проведения экспериментов на спутниках кубсат разработаны различные приборы для реги-

страции энергичных заряженных частиц, жесткого рентгеновского и гамма-излучения, а также оптического (ультрафиолетового и красного) свечения атмосферы.

К настоящему времени в ходе измерений на спутниках группировки Московского университета получены важные сведения об эффектах, связанных с различными проявлениями солнечной вспышечной активности и ее влиянием на геомагнитную обстановку в ОКП. К числу таких явлений относится проникновение СКЛ в полярные шапки, приводящее к существенному изменению радиационных полей во внутренней магнитосфере. В этом плане важную роль играет также изменение пространственной структуры распределения потоков высокоэнергичных электронов во внешнем РПЗ из-за магнитных бурь, которые, в свою очередь, являются следствием изменений параметров ММП и СВ из-за активных процессов на Солнце. Еще одним направлением в исследовании радиационной обстановки в ОКП является изучение динамики потоков субрелятивистских электронов в областях высыпаний из внутреннего ($L \sim 1.6 \div 1.8$) и внешнего РПЗ.

Ниже будут рассмотрены примеры наблюдений указанных явлений с использованием в основном приборов на КА «Авион» и некоторых других КА группировки «Созвездие-270». На борту КА «Авион» установлено три детекторных модуля прибора типа «ДеКоР»: «ДеКоР-1», «ДеКоР-2» и «ДеКоР-3» [Богомолов и др., 2020]. Приборы «ДеКоР» представляют собой сцинтилляционные спектрометры, в которых в качестве детекторного элемента используется комбинация тонкого слоя пластикового сцинтиллятора и более толстого кристалла CsI(Tl). Перед кристаллом CsI(Tl) расположен тонкий слой пластикового сцинтиллятора, который одновременно служит детектором заряженных частиц (в основном электронов) и активной защитой канала CsI(Tl), использующей разделение событий в разных сцинтилляторах по форме светового импульса на выходе фотодетекторов. Жесткое рентгеновское излучение регистрируется с помощью сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl).

Детекторы, установленные на КА «Авион», отличаются размером чувствительной области, оптимизированной для решения конкретных научных задач. В частности, модуль «ДеКоР-2» оптимизирован для регистрации и изучения космических гамма-всплесков различной природы. Он имеет эффективную площадь, увеличенную до $\sim 65 \text{ см}^2$, что необходимо для повышения чувствительности и улучшения временного разрешения, которое определяется, в первую очередь, статистикой регистрируемых гамма-квантов. Модуль «ДеКоР-2» представляет собой составной сцинтилляционный детектор (фосвич), состоящий из 3-мм пластикового сцинтиллятора и 9-мм кристалла CsI(Tl). Оба сцинтиллятора просматриваются сборкой кремниевых фотоумножителей (SiPM), что обеспечивает раздельную регистрацию гамма-квантов и электронов в диапазоне энерговыделений в сцинтилляторах от 20 кэВ до 1 МэВ. Такое разделение важно при проведении экспери-

мента по изучению гамма-всплесков на полярной орбите.

Для обеспечения более точных измерений в комплекс оборудования, помимо «ДеКоР-2», входят еще два детекторных модуля. Модуль «ДеКоР-1» со сцинтилляторами площадью $\sim 18 \text{ см}^2$, просматриваемыми двумя вакуумными фотоумножителями (ФЭУ), предназначен для изучения изменений потока электронов в диапазоне энерговыделения от 50 кэВ до 2 МэВ. Он полностью аналогичен приборам «ДеКоР», эксперименты с которыми проводились на КА «ВДНХ-80», «Норби», «Декарт» и других кубсатах [Богомолов и др., 2020]. Модуль «ДеКоР-3» добавлен для расширения диапазона регистрируемых гамма-квантов в область высоких энергий, т. е. до 5 МэВ. Его основное назначение — измерение энергетических спектров гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков. Детектирующим элементом данного блока является сцинтилляционный кристалл CsI(Tl) размерами $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}^3$, который просматривается двумя вакуумными ФЭУ.

Данные с каждого модуля «ДеКоР» регистрируются как в виде кадров мониторинга (скорость счета по нескольким каналам), так и в виде детальной событийной записи. Объем научных данных, передаваемых с приборов комплекса «ДеКоР» КА «Авион», составляет $\sim 5 \text{ МБ}$ в сутки. Основной тип передаваемых данных — кадры в режиме мониторинга с временным разрешением 1 с, причем в течение полета возможно многократное изменение этого значения как в большую, так и в меньшую сторону. Нижний порог регистрации квантов составляет несколько десятков килоэлектронвольт, его также можно изменять в ходе полета с учетом фоновых условий на околоземной орбите, при этом детекторы могут быть настроены по-разному.

Данные спутников кубсат группировки МГУ, включая КА «Авион», доступны в виде графиков и таблиц на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php>].

2. ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

2.1. Солнечные космические лучи

В качестве примера, иллюстрирующего возможности экспериментов по регистрации событий СКЛ на наноспутниках формата кубсат, рассмотрим два возрастания потоков солнечных электронов в полярных шапках: первое началось сразу после полуночи 8 июня 2024 г., второе — около полуночи 12 июня 2024 г. (рис. 1). На верхней панели показаны временные зависимости скоростей счета N электронов с энергией $> 300 \text{ кэВ}$, полученные приборами «ДеКоР-1» и «ДеКоР-3» на борту КА «Авион» (темно-голубые и фиолетовые точки соответственно). Показаны измерения в полярных шапках — областях открытых силовых линий, куда проникают СКЛ.

Обведенные маркеры (квадратами для ДеКоР-1 и кругами для ДеКоР-3) соответствуют измерениям

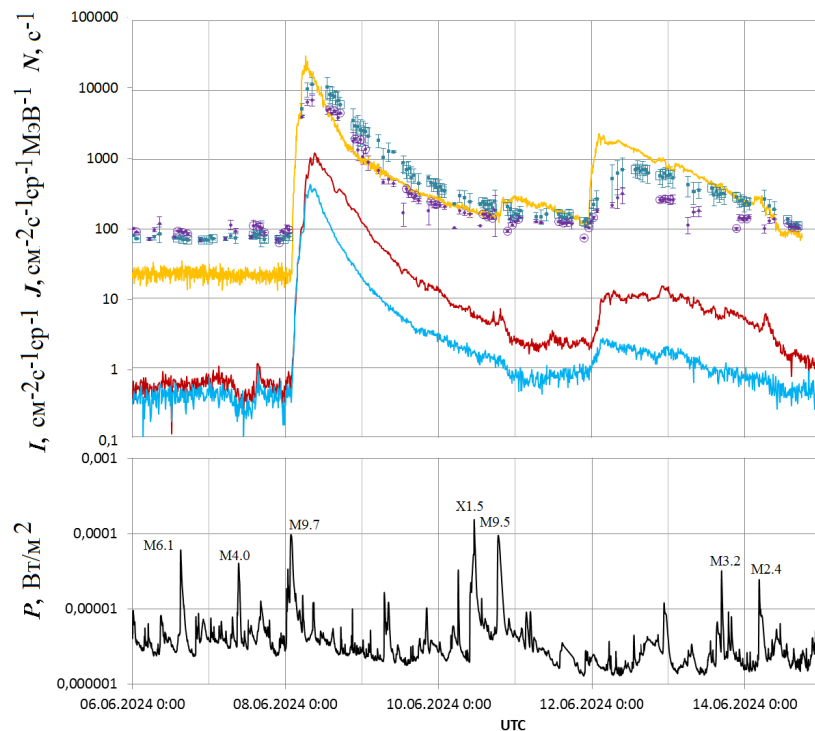


Рис. 1. Временные зависимости (вверху) скоростей счета N электронов с энергией >300 кэВ, полученные приборами «ДеКоР-1» и «ДеКоР-3» на борту КА «Авион» (темно-голубые и фиолетовые точки соответственно, обведенные маркеры соответствуют измерениям в южной полярной шапке, не обведенные — в северной), временная зависимость потока J электронов с энергией 175–315 кэВ, полученная в эксперименте на борту КА ACE (желтая кривая) и временные зависимости потоков I протонов с энергией 9–20 МэВ (красная кривая) и 20–40 МэВ (синяя кривая), полученные в эксперименте на борту КА «Электро-Л2»; внизу — временная зависимость потоков рентгеновского излучения, полученных по данным GOES

в южной полярной шапке, не обведенные — в северной. Видно, что кривые потоков электронов СКЛ в северной и южной шапках в данном событии не полностью идентичны, т. е. наблюдается асимметрия, которая может быть связана как с анизотропией потоков, так и с разной ориентацией приборов относительно силовых линий магнитного поля Земли. Одновременно с измерениями КА «Авион» на верхней панели показана временная зависимость потока J электронов с энергией 175–315 кэВ, полученная в эксперименте на борту КА ACE (желтая кривая) и временные зависимости потоков I протонов с энергией 9–20 МэВ (красная кривая) и 20–40 МэВ (синяя кривая), полученные прибором «СКИФ» в эксперименте на борту КА «Электро-Л2», функционирующего на геостационарной орбите. На нижней панели показана временная зависимость потоков рентгеновского излучения, полученная по данным КА GOES-16. Видно, что временные зависимости потоков электронов СКЛ в полярных шапках и в точке L1 достаточно хорошо согласуются, как наблюдалось в более ранних экспериментах [Кузнецов и др., 2003]. Следует отметить, что возможность получения данных о потоках электронов СКЛ вблизи Земли является преимуществом экспериментов на круговых полярных орбитах, поскольку такие данные не могут быть получены в экспериментах на геостационарной орбите вследствие того, что она находится во внешнем РПЗ.

Источником первого возрастания СКЛ (8 июня – 10 июня) стала солнечная вспышка класса M9.8

по классификации GOES (см. нижнюю панель рис. 1). Вспышка началась в 01:23 UT 8 июня 2024 г. в активной области (АО) AO13697, которая в момент вспышки находилась в южном полушарии вблизи западного лимба (координаты вспышки S18W69). Она была достаточно продолжительной — максимум мягкого рентгеновского излучения был отмечен в 01:49 UT, окончание вспышки — в 02:07 UT. Вспышка сопровождалась корональным выбросом массы (КВМ), который наблюдался в 01:48 UT 8 июня 2024 г. Из рис. 1 видно, что временные зависимости потоков протонов СКЛ по данным «Электро-Л2», и электронов СКЛ по данным КА ACE и «Авион» подобны, хотя и не идентичны, и имеют характерный для событий СКЛ от западных вспышек профиль — быстрый рост потока частиц СКЛ и значительно более длительный плавный спад. Видно, что увеличение потока солнечных протонов по данным «Электро-Л2» началось сразу после вспышки мягкого рентгеновского излучения в ~02:10 UT, максимальный поток протонов в указанном выше диапазоне, вызванный этим событием, наблюдался 8 июня в 06:20 UT.

Второе достаточно интенсивное событие СКЛ, показанное также на рис. 1, началось около полуночи 12 июня 2024 г. Его источником стала залимбовая вспышка, произошедшая, вероятно, в той же самой AO13697, что и вспышка, вызвавшая рассмотренное выше событие СКЛ. Данная вспышка также сопровождалась КВМ типа гало с начальной скоростью

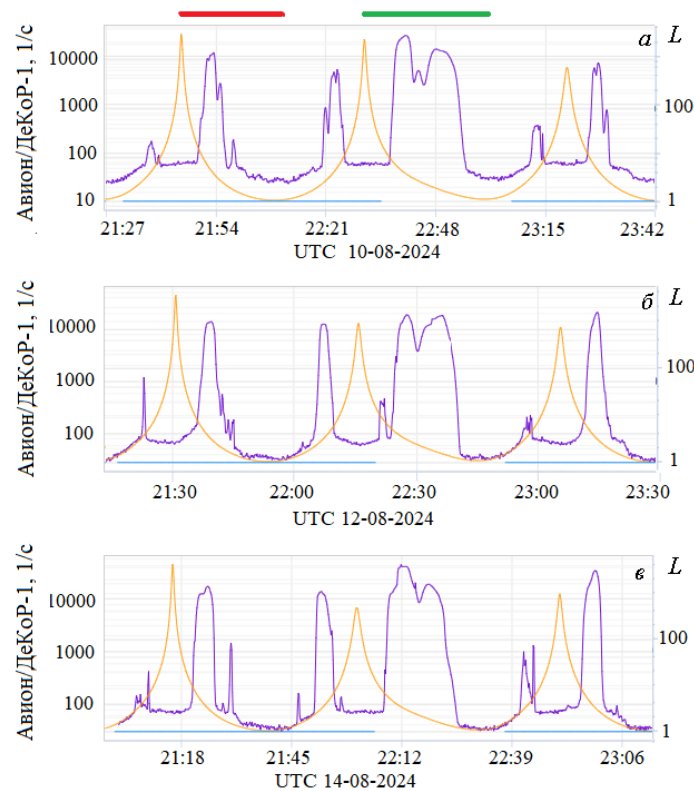


Рис. 2. Временные зависимости скоростей счета электронов прибором «ДеКоР-1» на борту спутника «Авион» (фиолетовая линия, левая шкала) и параметра МакИлвайна L (желтая линия, правая шкала) 10 августа (а), 12 августа (б) и 14 августа 2024 г. (е). Горизонтальными красной и зеленой линиями отмечены интервалы времени, использованные на рис. 4 (см. ниже)

~2000 км/с, который был зафиксирован 11 июня 2024 г. в 23:20 UT. Как и в первом рассмотренном событии СКЛ, одновременно с возрастаниями потоков электронов СКЛ в полярных шапках («Авион») и в L1 (АСЕ) вблизи полуночи с 11 на 12 июня 2024 г. прибором «СКИФ», установленным на геостационарном спутнике «Электро-Л2», также было отмечено возрастание, т. е. в обоих событиях СКЛ к орбите Земли пришли и протоны, и электроны СКЛ.

В заключение данного раздела хотелось бы отметить, что, несмотря на многолетние наблюдения событий СКЛ, создание каталогов СПС и теоретических моделей, некоторые вопросы остаются нерешенными. Так, даже в короткий рассмотренный выше период времени (см. рис. 1) можно видеть, что ни наиболее интенсивная за данный период вспышка X1.5 10 июня 2024 г. все в той же АО13697, ни последовавшая за ней (снова в той же АО) вспышка класса M9.5 не относятся к значимым СПС, сопоставимым по амплитуде с двумя рассмотренными выше событиями СКЛ для протонов и электронов. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования событий СКЛ, которые будут полезны при создании теоретических и прогностических моделей.

2.2. Динамика внешнего радиационного пояса Земли во время магнитной бури

Другим существенным проявлением космической погоды, которое также может быть отслежено

в экспериментах на наноспутниках формата кубсат, является изменение внешнего РПЗ во время магнитных бурь. Рассмотрим подробнее динамику внешнего РПЗ по данным спутника «Авион» в период с 11 по 15 августа 2024 г., когда наблюдалась достаточно высокая геомагнитная активность.

На рис. 2 показаны временные зависимости скоростей счета электронов с энергией >300 кэВ, регистрировавшихся прибором «ДеКоР-1» на борту КА «Авион» (фиолетовая линия, левая шкала) и параметра МакИлвайна L (желтая линия, правая шкала) для временных интервалов 10 августа 2024 г. с 21:27 по 23:42, 12 августа 2024 г. с 21:15 по 23:30 и 14 августа 2024 г. с 21:03 по 23:18 UT до, во время и после магнитной бури, начавшейся в конце суток 11 августа 2024 г. Приведенные интервалы подобраны таким образом, чтобы исключить долготный эффект, поскольку для каждого из трех интервалов времени КА проходит по одним и тем же долготам.

Видно, что полученные временные зависимости скоростей счета электронов внешнего РПЗ меняются со временем.

Рассмотрим подробнее геомагнитные условия данного интервала времени. Сильное возмущение ММП, вызванное, вероятно, прибытием к Земле межпланетного КВМ (МКВМ), который был результатом слияния нескольких, по крайней мере трех, КВМ, покинувших Солнце с 8 по 10 августа 2024 г. Максимальная скорость выброса, зарегистрированная LASCO/SOHO 8 августа 2024 г. в 19:48 UT, составила

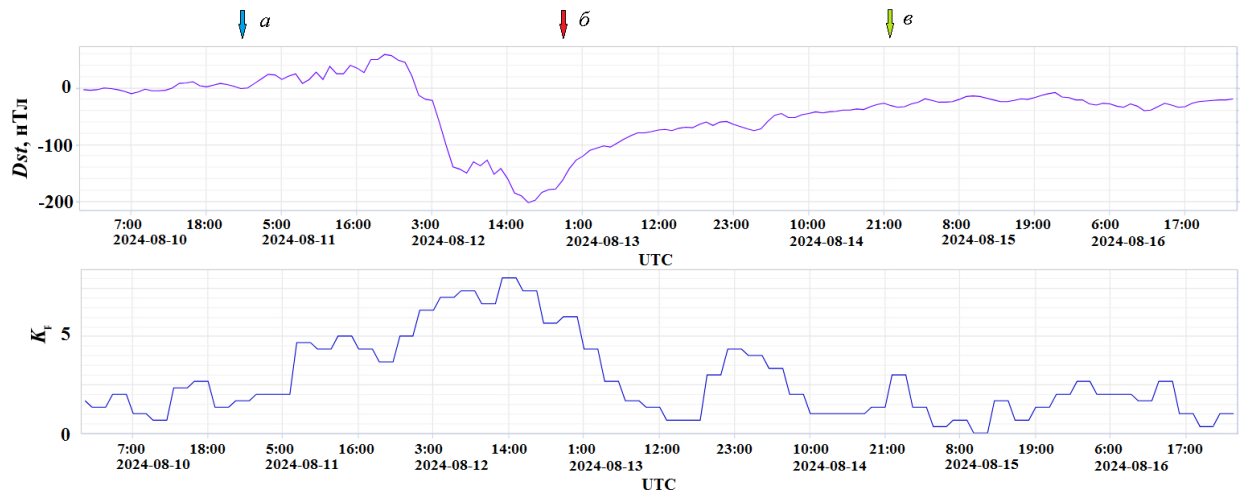


Рис. 3. Временные зависимости индексов геомагнитной активности Dst (вверху) и K_p (внизу). Стрелками отмечены моменты измерений на КА «Авион», показанные на рис. 4

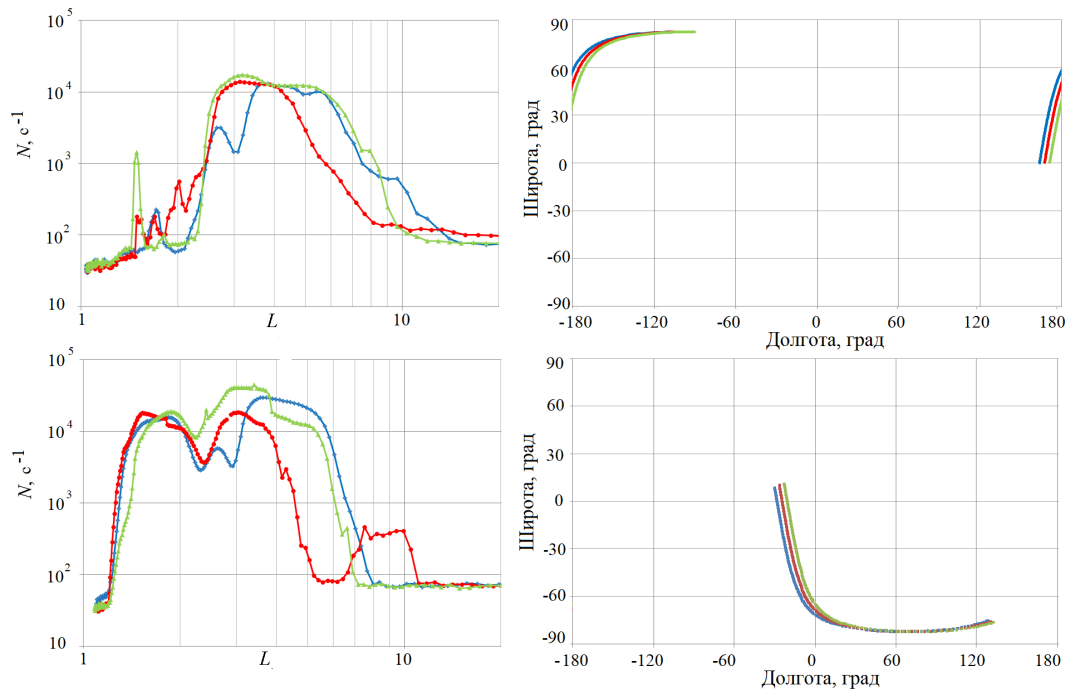


Рис. 4. Слева: зависимости от L скоростей счета электронов до (синяя линия), во время (красная линия) и после (зеленая линия) магнитного возмущения 11–12 августа 2024 г. для интервалов времени, отмеченных на рис. 2 красной линией (верхняя панель) и зеленой линией (нижняя панель). Справа: карты с проекцией на Землю орбиты спутника «Авион» для наблюдений, показанных на левых панелях

составила 789 км/с, максимальная скорость СВ на орбите Земли составила ~ 520 км/с, максимальная плотность СВ ~ 35 см $^{-3}$.

Главная фаза бури началась около полуночи с 11 на 12 августа 2024 г. Максимальная амплитуда вариации $Dst \sim -203$ нТл была отмечена в 17:00 12 августа, максимальный индекс K_p составил 8. Геомагнитные индексы K_p и Dst для 9–16 августа 2024 г. показаны на рис. 3. Цветные стрелки — моменты времени, когда были получены данные о внешнем РПЗ (см. далее рис. 4).

На левой панели рис. 4 показаны зависимости от L пропорционального магнитной широте места измерения, скоростей счета электронов до (синяя линия), во время (красная линия) и после (зеленая линия) маг-

нитного возмущения 11–12 августа 2024 г. для интервалов времени (см. стрелки на рис. 3). На правой панели показаны карты с проекцией на Землю орбиты спутника «Авион» для наблюдений, представленных на левых панелях. Кривые получены по данным наблюдений для следующих интервалов времени, которые соответствуют пересечению орбиты спутника с РПЗ (см. рис. 2), когда КА двигался из полярной области к экватору. Верхняя панель показывает данные 10 августа 2024 г. в 21:46–22:10, 12 августа в 21:31–21:55 и 14 августа в 21:16–21:40 UT, т. е. в Северном полушарии. Нижняя панель показывает данные 10 августа 2024 г. в 22:30–23:00, 12 августа 2024 г. в 22:15–22:45 и 14 августа в 22:00–22:30 UT, т. е. в Южном полушарии.

Видно, что в Северном полушарии в максимуме бури интенсивность внешнего РПЗ практически не изменилась, но его максимум сместился ближе к Земле, с $L=4$ до $L=3$, где до бури располагался зазор между внешним и внутренним поясами. Высокоширотная граница внешнего РПЗ также передвинулась на меньшие L — с $L\sim 8\div 9$ до $L\sim 6\div 7$. В Южном полушарии в максимуме бури интенсивность потоков субрелятивистских электронов падала в несколько раз, экваториальная граница, как и в Северном полушарии сдвинулась на меньшие L , т. е. в обоих полушариях зазор заполнился частицами. В Южном полушарии полярная граница внешнего РПЗ смещалась с $L\sim 7\div 8$ до $L\sim 5\div 6$. Поскольку экваториальная граница внешнего пояса сдвигалась слабее в обоих полушариях, можно сказать, что к концу главной фазы бури внешний пояс как бы сжимался. В Южном полушарии также обращает на себя внимание дополнительное высокоширотное возрастание потоков электронов в области L от 8 до 10. Выяснение природы подобных высокоширотных возражений требует дальнейших исследований.

В конце фазы восстановления (14 августа) высокоширотная граница внешнего РПЗ вернулась в добуриное состояние в обоих полушариях. В Южном полушарии интенсивность в максимуме, который оставался ближе к Земле, чем до бури, возросла. Полярная граница внешнего РПЗ вернулась к добуриному состоянию в обоих полушариях, добуриевой зазор остался заполненным частицами, т. е. область пространства, заполненная электронами внешнего РПЗ в результате воздействия геомагнитной бури в данном случае увеличилась, как это неоднократно наблюдалось в других экспериментах (например, [Мягкова и др., 2021]).

2.3. Высыпание электронов из внутреннего пояса

Третьей проблемой с точки зрения явлений космической погоды является исследование вариаций высыпаний из внутреннего РПЗ. В качестве примера рассмотрим вариации скорости счета электронов в области высыпаний из внутреннего РПЗ ($L\sim 1.6\div 1.8$). Перед магнитной бурей наблюдался один пик интенсивности на $L\sim 1.7$ (синяя кривая на рис. 4). Во время бури появилось еще два дополнительных пика — на $L\sim 1.6$ и $L\sim 2$ (красная кривая на рис. 4). После окончания бури амплитуда пика на $L\sim 1.6$ значительно возросла после ее окончания (зеленая кривая на рис. 4). Отметим, что пики вблизи 1.6 наблюдались в $\sim 21:44$ 12 августа и $\sim 21:30$ UT 14 августа, т. е. примерно в одно время. Таким образом, возникает вопрос, связана ли динамика скорости счета субрелятивистских электронов, высыпающихся из внутреннего РПЗ на $L\sim 1.6$, с геомагнитной активностью или есть другие факторы.

Для прояснения этого вопроса были рассмотрены данные измерений, полученные на КА «Авион» во время магнитной бури 8 августа 2024 г. и в спокойный период 25 сентября – 3 октября 2024 г. Временные зависимости скорости счета электронов

с энергией >300 кэВ по измерениям КА «Авион» с помощью прибора «ДеКоР-1» показаны на рис. 5. Также были проанализированы данные кубсата «Альтаир», полученные 13 декабря 2024 г., также во время магнитно-спокойного периода.

Карта с проекцией на Землю орбит кубсатов «Авион» и «Альтаир» для этих измерений показана на рис. 6. Поскольку орбиты КА близки к солнечно-синхронным, они проходят через одни и те же регионы примерно в одно и то же время UT. Кружками отмечены области, где наблюдались высыпания субрелятивистских электронов из внутреннего РПЗ.

Зависимости скоростей счета электронов >300 кэВ от L , полученные с помощью кубсатов «Авион» и «Альтаир» (см. траектории на рис. 6), показаны на рис. 7. Зеленая линия — данные КА «Авион», полученные 14 августа 2024 г., 21:16–21:40 по всемирному времени (после магнитной бури, начавшейся 11 августа 2024 г.); желтая («Авион») — 28 сентября 2024 г., 21:38–22:00 по всемирному времени (аналогичная орбита и всемирное время, $Dst=-11$ нТл, $K_p=2+$); фиолетовая («Авион») — 28 сентября 2024 г., 12:06–12:30 по всемирному времени (другая орбита и всемирное время, $Dst=3$ нТл, $K_p=2-$); красная («Альтаир») — 13 декабря 2024 г., 09:48–10:11 по всемирному времени (аналогичная орбита, другое всемирное время, $Dst=1$ нТл, $K_p=1+$); голубая («Альтаир») — 13 декабря 2024 г., 16:53–17:17 по всемирному времени (другая орбита, похожее всемирное время, $Dst=-6$ нТл, $K_p=1+$).

На показанных выше рисунках видно, что в исследуемых областях (на $L\sim 1.7$) наблюдались кратковременные резкие возрастания (пики) потоков электронов с энергией >300 кэВ и до начала магнитной бури (10 августа), и во время магнитной бури (12 августа), и в декабре 2024 г. в магнитно-спокойный период (данные кубсата «Альтаир»). В то же время во время магнитной бури в августе появился еще один пик на $L\sim 1.6$, достигший существенно большей амплитуды 14 августа, а пик на $L\sim 1.7$ перестал наблюдаться. Совокупность этих фактов позволяет предположить, что геомагнитная буря 11–12 августа 2024 г. была настолько сильной, что вызвала возмущение не только внешнего, но и внутреннего РПЗ, что привело к изменению распределения потоков субрелятивистских электронов в области высыпаний.

Если же рассматривать эту область в целом, т. е. от $L\sim 1.6\div 1.9$, следует отметить, что резкие возрастания потоков субрелятивистских электронов на данных L -оболочках могут наблюдаться в районе 180° E как во время магнитных бурь, так и в магнитоспокойные периоды, и достигать максимальных значений в вечернее время по UT.

Для того чтобы проверить, обусловлены ли наблюдаемые максимумы интенсивности высыпающихся электронов определенным UT или отражают пространственное распределение потоков на определенных дрейфовых оболочках или в определенных географических областях, были проанализированы измерения на орбитах, пересекающих оболочки $L\sim 1.6\div 1.9$ на других долготах (фиолетовая кривая на рис. 6, 7).

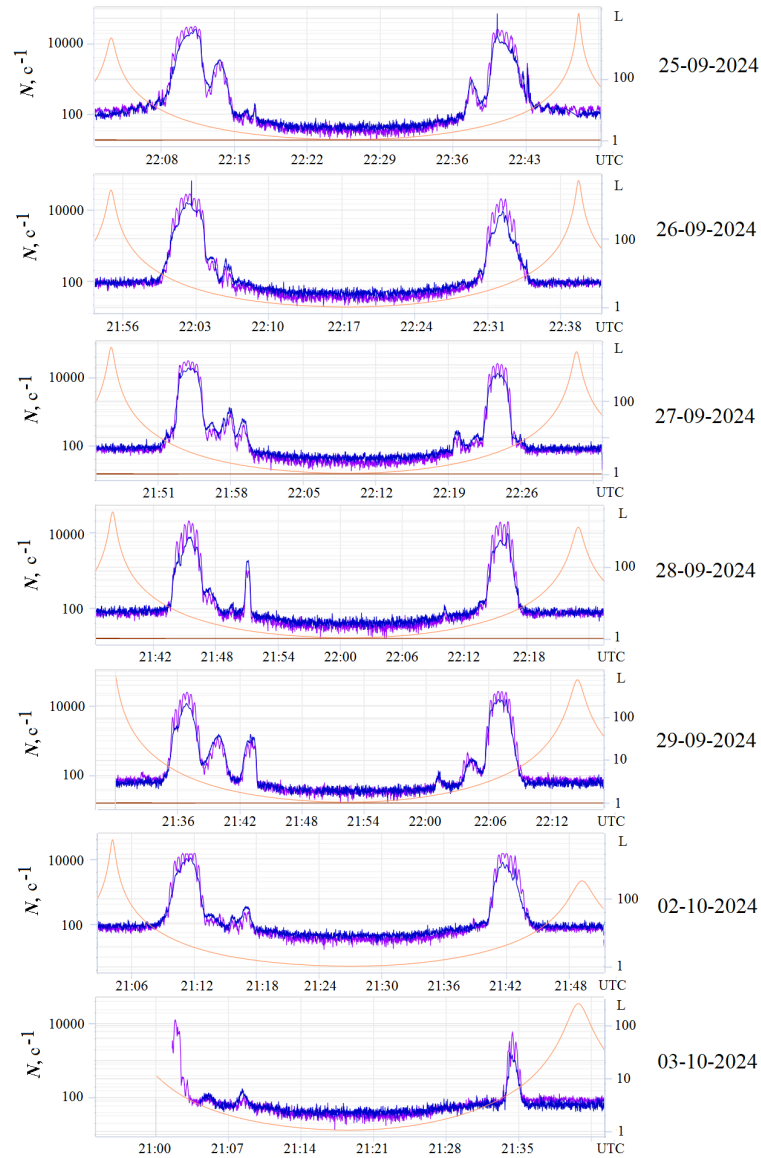


Рис. 5. Временные зависимости скоростей счета электронов от приборов «ДеКоР-1» (фиолетовая линия, левая шкала) и «ДеКоР-3» (синяя линия, левая шкала) на КА «Авион», а также параметра МакИллвайна L (оранжевая линия, правая шкала) для магнитоспокойных периодов

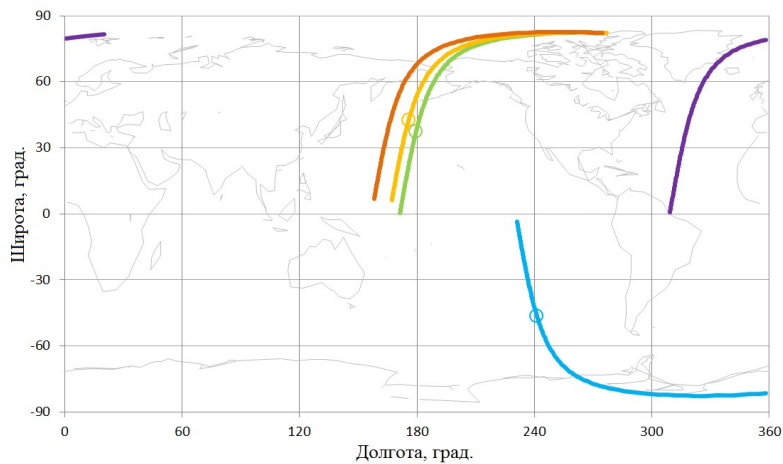


Рис. 6. Карта с проекцией на Землю орбит кубсатов «Авион» и «Альтаир»: зеленая линия — орбита КА «Авион» 14 августа 2024 г. в 21:16–21:40; желтая линия — орбита КА «Авион» 28 сентября 2024 г. в 21:38–22:00; фиолетовая линия — орбита КА «Авион» 28 сентября 2024 г. в 12:06–12:30; оранжевая линия — орбита КА «Альтаир» 13 декабря 2024 г. в 09:48–10:11; синяя линия — орбита КА «Альтаир» 13 декабря 2024 г. в 16:53–17:17 UT. Кружками отмечены области, где наблюдались высыпания субрелятивистских электронов из внутреннего пояса

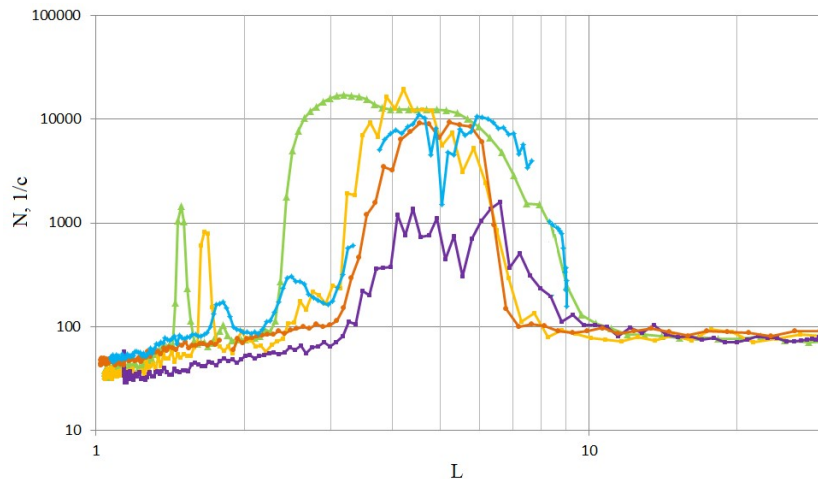


Рис. 7. Зависимости от L скоростей счета электронов, полученные на кубсатах «Авион» и «Альтаир» для измерений, показанных на рис. 5 и 6. Зеленая линия — «Авион» 14.08.2024, 21:16–21:40 UT (после магнитной бури); желтая линия — «Авион» 28.09.2024, 21:38–22:00 UT (аналогичная орбита и всемирное время); фиолетовая линия — «Авион» 28.09.2024, 12:06–12:30 UT (другая орбита и всемирное время); красная линия — «Альтаир» 13.12.2024, 09:48–10:11 UT (аналогичная орбита, другое всемирное время); голубая линия — «Альтаир» 13.12.2024, 16:53–17:17 UT (другая орбита, похожее всемирное время)

На рис. 7 видно, что на долготах $\sim 320^\circ$ – 330° около полудня по мировому времени не наблюдалось повышений интенсивности на $L \sim 1.6 \div 1.7$, что позволяет сделать вывод о том, что высыпания на этих долготах, вероятно, привязаны либо к определенной географической области, либо к определенному интервалу UT.

Для анализа обеих возможностей было проведено сравнение скорости счета электронов, измеренной при прохождении одного и того же региона разными КА, пересекающими его в разные моменты мирового времени. Для этого в дополнение к данным КА «Авион» на рис. 6, 7 показаны еще две траектории и два дополнительных профиля скорости счета субрелятивистских электронов в зависимости от L (красная и голубая линии). Они были получены в результате измерений с помощью «ДеКоР-2» (измерял также скорости счета электронов с энергией >300 кэВ) на кубсате «Альтаир», орбита которого аналогична орбите КА «Авион». Красная кривая на рис. 7 показывает зависимость потока электронов от L , измеренную, когда «Альтаир» пересекал ту же область на $L \sim 1.6$, что и «Авион», но гораздо раньше (09:48–10:11 UT). В этом случае не наблюдалось увеличения потока электронов на $L < 2$. Однако пик на $L \sim 1.8$ был выявлен во время других пролетов КА «Альтаир», зависимость от L для одного из которых показана на рис. 7 голубой линией. В это время (16:53–17:17 UT) «Альтаир» двигался от южной полярной шапки к экватору над Тихим океаном. Эти результаты позволяют сделать вывод, что значительные пики на $L \sim 1.6 \div 1.9$ наблюдаются в разных географических регионах, но в определенные интервалы UT, т. е. в основном днем и вечером.

Следует отметить, что значительные потоки субрелятивистских электронов на $L \sim 1.6 \div 1.9$ ранее наблюдались на КА «ОНЗОРА» [Nagata et al., 1988], «КОРОНАС-И» [Bashkirov et al., 1999; Кузнецов, Мяжкова, 2001; Kuznetsov, Myagkova, 2002] и орбитальной станции «Мир» [Богомолов и др., 2005]. В част-

ности, в [Kuznetsov, Myagkova, 2002] показано, что электроны на $L \sim 1.6$ регистрируются в основном от 10 до 24 UT на долготах 110° – 200° , 200° – 290° . Авторы работы [Kuznetsov, Myagkova, 2002] делают вывод, что высыпания на $L \sim 1.6$ могут быть вызваны грозовой активностью, однако не исключают и их возможную связь с вариациями индексов геомагнитной активности. Можно сказать, что результаты измерений потоков субрелятивистских электронов на $L \sim 1.6 \div 1.9$ на КА группировки Московского университета не противоречат этим выводам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены примеры наблюдения некоторых явлений космической погоды в экспериментах, проводимых с помощью приборов, созданных в НИИЯФ МГУ и установленных на кубсатах группировки спутников «Созвездие-270» Московского университета. В частности, показаны возможности измерений потоков солнечных электронов в ОКП для событий СКЛ, проведены наблюдения за заполнением полярных шапок частицами СКЛ, на основании которых получены временные зависимости средней скорости счета субрелятивистских электронов в полярных шапках во время событий СКЛ 8–10 и 12–14 июня 2024 г. Эти зависимости хорошо согласуются с временным ходом потоков электронов СКЛ в точке либрации L1, измеренных на КА АСЕ, а также с профилем протонов СКЛ по данным КА «Электро-Л2». Получены также данные о динамике пространственных распределений потоков субрелятивистских электронов во внешнем РПЗ во время сильной магнитной бури 11 и 12 августа 2024 г., показавшие, что во время главной фазы магнитной бури область внешнего РПЗ как бы сжимается. В данном случае это происходит за счет меньшего сдвига экваториальной границы пояса (в область добуревого положения зазора) по сравнению с более

заметным сдвигом полярной границы РПЗ. На фазе восстановления полярная граница возвращается к положению, наблюдавшемуся до бури, а экваториальная граница продолжает оставаться близко к Земле, за счет чего область, занятая субрелятивистскими электронами внешнего РПЗ, расширяется.

Стоит отметить также результаты исследований динамики потоков субрелятивистских электронов, высыпавшихся из внутреннего РПЗ на $L \sim 1.6 \div 1.8$. Показано, что в целом значимые потоки на указанных дрейфовых оболочках наблюдаются в разных географических районах в определенном интервале УТ при разных уровнях геомагнитной активности. В то же время в случае очень сильной магнитной бури 11, 12 августа 2024 г. пространственное распределение потоков электронов в области высыпаний претерпело некоторые вариации. Полученные результаты не противоречат выводам, которые были сделаны ранее по наблюдениям на КА «ОНЗОРА» и «КОРОНАС-И». Особо следует отметить, что для получения более полной картины динамики и пространственной структуры высыпавшихся электронов впервые были использованы данные наблюдений с разных КА многоспутниковой группировки «Созвездие-270» Московского университета. Естественно, для того чтобы сделать определенные выводы о динамике и механизмах высыпаний субрелятивистских электронов из внутреннего РПЗ, необходимы дальнейшие исследования, в которые многоспутниковые измерения могут внести существенный вклад. В этой связи роль наноспутниковой группировки «Созвездие-270» Московского университета крайне важна.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», проект № 24-Ш01-05 «Созвездие 270», а также в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004, т. 44, № 4, с. 502–510.
- Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я. и др. Потоки квазизахваченных электронов с энергиями >0.08 МэВ в околоземном пространстве на дрейфовых оболочках $L < 2$. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 5, с. 323–329.
- Богомолов В.В., Богомолов А.В., Дементьев Ю.Н. и др. Первый опыт мониторинга космической радиации в многоспутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ». *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия*. 2020, т. 73, № 6, с. 135–141.
- Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. *Доклады Академии наук*. 1958, т. 120, № 6, с. 1231–1233.
- Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. *Солнечные космические лучи*. М.: Наука, 1968, 468 с.
- Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н. Потоки квазизахваченных частиц над радиационными поясами Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*, 2001, т. 41, № 1, с. 12–15.
- Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Денисов Ю.И. и др. Солнечная вспышка 4 ноября 2001 г. и ее проявления в энергичных частицах по данным ИСЗ «Коронас-Ф». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2003, т. 37, № 2, с. 137–143. DOI: [10.1023/A:1023384425209](https://doi.org/10.1023/A:1023384425209).
- Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Попова Е. Действующие модели потоков заряженных частиц космического пространства и новые экспериментальные данные. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2014, № 1, с. 44–48.
- Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Еремеев В.Е. и др. Динамика радиационной обстановки в околоземном пространстве в сентябре–ноябре 2020 г. по данным спутников «Метеор-М» и «Электро-Л». *Космические исследования*. 2021, т. 59, № 6, с. 460–472. DOI: [10.31857/S0023420621060078](https://doi.org/10.31857/S0023420621060078).
- Новиков Л.С., Воронина Е.Н. *Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой*. М.: КДУ, 2021.
- Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. 1. Описание эксперимента. *Космические исследования*. 2016а, т. 54, № 4, с. 277–285. DOI: [10.7868/S002342061604004X](https://doi.org/10.7868/S002342061604004X).
- Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. 2. Первые результаты. *Космические исследования*. 2016б, т. 54, № 5, с. 369–376. DOI: [10.7868/S0023420616050071](https://doi.org/10.7868/S0023420616050071).
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В. и др. Статистическая связь частоты сбоя на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 3, с. 186–193.
- Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследования космической среды на микроспутниках «Университетский—Татьяна» и «Университетский—Татьяна-2». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2011, т. 45, № 1, с. 5–31.
- Baker D.N. Satellite Anomalies due to space storms. *Space Storms and Space Weather Hazards*. 2001, vol. 38. Springer, Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-010-0983-6_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6_11).
- Bashkurov V.F., Denisov Y.I., Gotselyuk Y.V., et al. Trapped and quasi-trapped radiation observed by “CORONAS-I” satellite. *Radiation Measurements*. 1999, vol. 30, no. 5, pp. 537–546.
- Caspi A., Barthelemy M., Bussy-Virat C.D., et al. Small satellite mission concepts for space weather research and as pathfinders for operations. *Space Weather*, 2022, vol. 20, iss. 2, e2020SW002554. DOI: [10.1029/2020SW002554](https://doi.org/10.1029/2020SW002554).
- Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability. *Space Sci. Rev.* 2003, vol. 107, pp. 295–302. DOI: [10.1023/A:1025500513499](https://doi.org/10.1023/A:1025500513499).
- Daglis I.A. *Space Storms and Space Weather Hazards*. Kluwer, Dordrecht, Boston, 2001. DOI: [10.1007/978-94-010-0983-6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6).
- Ginet G.P., O’Brien T.P., Huston S.L. AE9, AP9 and SPM: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment. *Space Sci. Rev.* 2013, vol. 179, pp. 579–615 DOI: [10.1007/s11214-013-9964y](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9964y).
- Iucci N., Levitin A., Belov E., Eroshenko E.A. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, S01001. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kudela K. Space weather near Earth and energetic particles: selected results. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2013, vol. 409, iss. 1, article id. 012017. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012017).
- Kuznetsov S.N., Myagkova I.N. Quasi-trapped electron fluxes (>0.5 MeV) under the radiation belts: analysis of their con-

А.В. Богомолов, В.В. Богомолов, А.Ф. Июдин, В.В. Калегает, И.Н. Мяжкова, В.И. Оседло, С.И. Свертилов, И.В. Яшин

A.V. Bogomolov, V.V. Bogomolov, A.F. Iyudin, V.V. Kalegaev, I.N. Myagkova, V.I. Osedlo, S.I. Svertillov, I.V. Yashin

- nection with geomagnetic indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 5-6, pp. 601–605.
- Lundstedt H. The Sun, space weather and GIC effects in Sweden. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, no. 6, pp. 1182–1191. DOI: [10.1016/j.asr.2005.10.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.023).
- McGranaghan R.M., Camporeale E., Georgoulis M., Anastasiadis A. Space weather research in the digital age and across the full data lifecycle: Introduction to the topical issue. *J. Space Weather and Space Climate.* 2021, vol. 11, p. 50. DOI: [10.1051/swsc/2021037](https://doi.org/10.1051/swsc/2021037).
- Nagata K., Kohno T., Murakami H., et al. Electron (0.19–3.2 MeV) and proton (0.58–35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones $L=1.6$ –1.8. *Planet. Space Sci.* 1988, vol. 36, pp. 591–606.
- Potapov A., Ryzhakova L., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit. *Acta Astronaut.* 2016, vol. 126, pp. 47–51. DOI: [10.1016/j.actaastro.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.017).
- Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M., et al. “Lomonosov” satellite — space observatory to study extreme phenomena in space. *Space Sci. Rev.* 2017, vol. 212, no. 3-4, pp. 1705–1738.
- Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map 772 for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, pp. 2745–2807. DOI: [10.1016/j.asr.2015.03.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023).

- Wei F., Feng X., Guo J.S., et al. Space weather research in China. *Adv. in Space Environment Res.* Springer, Dordrecht. 2003, pp. 327–334. DOI: [10.1007/978-94-007-1069-6_31](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1069-6_31).
- Wilkinson P. Space weather studies in Australia. *Space Weather: The Intern. J. Research and Applications.* 2009, vol. 7, S06002. DOI: [10.1029/2009SW000485](https://doi.org/10.1029/2009SW000485).
URL: <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php> (дата обращения 22 июля 2025 г.).

15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

Как цитировать эту статью:

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Июдин А.Ф., Калегает В.В., Мяжкова И.Н., Оседло В.И., Свертилов С.И., Яшин И.В. Мониторинг явлений космической погоды с использованием группировки наноспутников Московского университета «Созвездие-270». *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 3, с. 137–148. DOI: [10.12737/szf-113202515](https://doi.org/10.12737/szf-113202515).