

К 60-ЛЕТИЮ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ «НПО имени С.А. ЛАВОЧКИНА»: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С АППАРАТУРОЙ РЭЛЕК НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ВЕРНОВ» (МКА-ФКИ № 2)

С.И. Свертилов¹,
доктор физико-
математических наук,
sis@coronas.ru;
S.I. Svertilov

В.В. Богомолов¹,
кандидат физико-
математических наук,
bogovit@rambler.ru;
V.V. Bogomolov

А.Ф. Иудин¹,
доктор физико-
математических наук,
aiyudin@srd.sinp.msu.ru;
A.F. Iyudin

В.В. Калегаев¹,
доктор физико-
математических наук,
klg@dec1.sinp.msu.ru;
V.V. Kalegaev

И.В. Яшин¹,
кандидат физико-
математических наук,
iv_n@bk.ru
I.V. Yashin

А.Е. Ширшаков²,
кандидат
технических наук,
SHirshakovAE@
laspace.ru;
A.E. Shirshakov

ON THE 60TH ANNIVERSARY OF THE LAVOCHKIN ASSOCIATION SPACE ACTIVITIES: THE MAIN RESULTS OF ESPERIMENTS WITH RELEC PAYLOAD ON-BOARD VERNOV SPACECRAFT (MKA-FKI № 2)

А.В. Богомолов¹,
кандидат физико-
математических наук,
aabboogg@srd.sinp.msu.ru;
A.V. Bogomolov

Г.К. Гарипов¹,
ggkmsu@yandex.ru;
G.K. Garipov

П.А. Климов¹,
доктор физико-
математических наук,
pavel.klimov@gmail.com;
P.A. Klimov

И.Н. Мягкова¹,
кандидат физико-
математических наук,
irina@srd.sinp.msu.ru;
I.N. Mjagkova

Н.М. Хамидуллина²,
кандидат физико-
математических наук,
KHamidullinaNM@
laspace.ru;
N.M. Khamidullina

В статье рассказывается об основных результатах экспериментов с полезной нагрузкой РЭЛЕК на космическом аппарате «ВЕРНОВ» (МКА-ФКИ № 2). Аппаратура РЭЛЕК была создана в НИИЯФ МГУ, а космический аппарат «ВЕРНОВ» – в АО «НПО им. С.А. Лавочкина». В ходе экспериментов были получены важные результаты в области физики магнитосферно-атмосферных взаимодействий, о транзитных электромагнитных явлениях в атмосфере, динамики и характеристиках потоков электронов субрелятивистских электронов в околоземном пространстве.

Ключевые слова:
космический аппарат; космическая радиация;
электроны, атмосферные гамма-всплески,
транзитные световые явления.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.006

The article presents the main results of experiments with the RELEC payload on the VERNOV spacecraft (MKA-FKI № 2). The RELEC instruments was elaborated in the MSU Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, and the VERNOV spacecraft was manufactured in the Lavochkin Scientific and Production Association. During the experiments important results in the physics of magnetospheric-atmospheric interactions, transient electromagnetic phenomena in the atmosphere, and the dynamics and parameters of sub-relativistic electron fluxes in near-Earth space were obtained.

Key words:
spacecraft; space radiation;
electrons; terrestrial gamma ray flashes;
transient lightning events.

¹ НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобелевца, МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Россия, г. Москва.
Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (MSU SINP), Russia, Moscow.

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

В ходе многолетнего плодотворного сотрудничества коллективов АО «НПО им. С.А. Лавочкина» (НПОЛ) и НИИЯФ МГУ, в том числе, был реализован проект космических экспериментов с аппаратурой РЭЛЕК («Релятивистские ЭЛЕКТроны») на спутнике «ВЕРНОВ» (МКА-ФКИ № 2).

1. Цели и задачи экспериментов с аппаратурой РЭЛЕК на спутнике «ВЕРНОВ»

Основными объектами научных исследований с аппаратурой РЭЛЕК на спутнике «ВЕРНОВ» были транзиентные (быстропротекающие) энергичные явления (Transient Energetic Phenomena, TEP), наблюдающиеся в атмосфере Земли. Под TEP подразумеваются гамма-вспышки из атмосферы Земли (Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGF) и транзиентные молниевые явления (Transient Lightning Events, TLE).

Несмотря на более, чем 20-летний период экспериментальных и теоретических исследований, однозначной интерпретации таких явлений пока нет. Большой интерес имеет предсказанный в 1992 году и к настоящему времени подробно изученный теоретически механизм пробоя на «убегающих электронах» (ПУЭ) (Gurevich A.V. et al., 1992; Dwyer J.R. et al., 2012). Если пробой на «убегающих электронах» происходит вплоть до высот ~65–75 км, то электроны с $E \sim 1$ МэВ и выше могут проникать в магнитосферу Земли и подпитывать радиационные пояса. Такие электроны могут давать более продолжительный, до ~20–30 мс, отклик в детекторах, регистрирующих гамма-излучение.

Релятивистские электроны, инициирующие высотные разряды в мезосфере могут попадать в эту область из космического пространства, например, при высыпании из радиационных поясов Земли (модель «сверху – вниз», в отличие от модели «снизу – вверх», описывающей распространение лавины «убегающих электронов»).

Динамику релятивистских электронов радиационных поясов Земли можно рассматривать как самостоятельную физическую проблему. Процессы ускорения, переноса и потерь этих электронов обусловлены радиальной и питч-угловой диффузией, а также их локальным ускорением. В настоящее время потоки релятивистских электронов регистрируются на высокоапогейных спутниках (Van Allen Probes, GPS и «ГЛОНАСС»), на геостационарной орбите (GOES и «ЭЛЕКТРО») и на низковысотных спутниках (POES, «МЕТЕОР»). Измерения на спутнике «ВЕРНОВ» существенно дополнили другие эксперименты с релятивистскими электронами радиационных поясов Земли.

Высыпание электронов из радиационных поясов связано, прежде всего, с волновой активностью и одновременные измерения потоков электронов и электромагнитных волн в различных частотных диапазонах (от 0.1 Гц до 15 МГц) на спутнике «ВЕРНОВ» позволили существенно продвинуться в понимании этих связей.

Изучение динамики релятивистских электронов имеет и прикладной аспект: будучи высокопроницаемыми частицами, они приводят к электризации и деградации элементов конструкции спутников (прежде всего, солнечных батарей), к сбоям в работе электронной аппаратуры и выходу ее из строя.



рисунок 1. Общий вид космического аппарата «ВЕРНОВ»

2. Космический аппарат «ВЕРНОВ»

Для решения поставленных задач был разработан и изготовлен комплекс научной аппаратуры (КНА) РЭЛЕК, установленный на малом космическом аппарате МКА-ФКИ № 2, получившем наименование «ВЕРНОВ» в честь основоположника отечественной космофизической науки академика Сергея Николаевича Вернова. Аппарат выполнен на базе платформы «Карат», разработки и производства НПОЛ (Хартов В.В., 2011). Общий вид космического аппарата изображён на рисунке 1.

Спутник имел следующие характеристики:

- масса – 283 кг;
- точность ориентации – 6 угл. мин;
- точность стабилизации – 0.0015 °/с;
- скорость передачи данных – 5 Мбит/с.

Рабочая орбита спутника – солнечно-синхронная: апогей – 830 км; перигей – 640 км; наклонение – 98.4°; период обращения – 100 мин.

Функционирование научной аппаратуры осуществлялось по рабочим циклограммам. Основной режим – мониторинговые наблюдения, когда все приборы КНА были включены и работали одновременно. При этом обеспечивался регулярный сброс данных на Землю в объёме до 1.2 Гбайт в сутки. Запуск спутника был осуществлён 8 июля 2014 года, он функционировал на орбите вплоть до 7 декабря 2014 года.

3. Комплекс научной аппаратуры РЭЛЕК

Комплекс научной аппаратуры РЭЛЕК должен был обеспечить мониторинговые измерения потоков электронов высоких энергий с высоким временным разрешением (не менее 1 мс) и возможностью определения анизотропии потоков, а также регистрацию ТЕР в широком диапазоне электромагнитного спектра – от радио- до гамма- с временным разрешением не менее 50 мкс и измерения пульсаций электрического и магнитного полей в диапазоне частот от 0.1 Гц до 15 МГц.

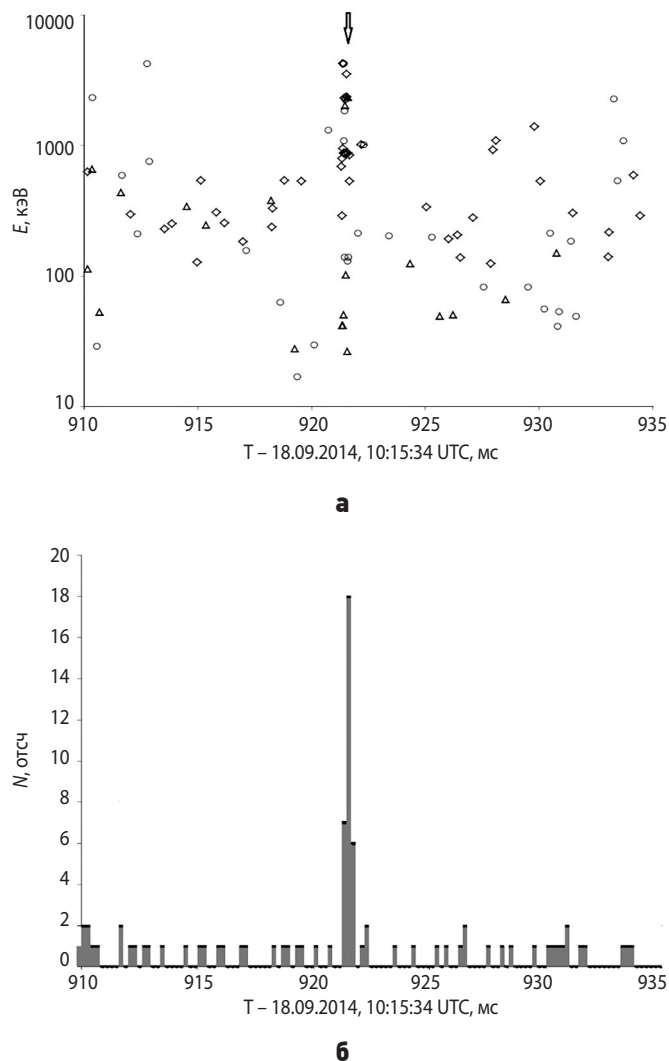
В состав КНА входят пять приборов, включая детектирующие устройства – ДРГЭ (в составе двух идентичных блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 и блока ДРГЭ-3), ДУФ, «Телескоп-Т», комплекс НЧА-РЧА, а также блок электроники (БЭ). С помощью указанных приборов на борту спутника «ВЕРНОВ» проводились следующие эксперименты: регистрация всплесков гамма-излучения и высыпаний электронов, наблюдения транзиентных световых явлений, мониторинг магнитоволновой обстановки.

При проведении указанных космических экспериментов на спутнике «ВЕРНОВ» все детектирующие приборы КНА (ДРГЭ, ДУФ, Телескоп-Т, НЧА, РЧА) были соединены с прибором БЭ, через который на них от бортовых систем поступало напряжение

питания и команды управления, а от детектирующих приборов на борт спутника – научная и телеметрическая информация.

4. Результаты наблюдений гамма-всплесков из атмосферы Земли

В ходе наблюдений на спутнике «ВЕРНОВ» с помощью прибора ДРГЭ-1(2) было зарегистрировано несколько гамма-всплесков земного происхождения (TGF) и несколько десятков кандидатов в TGF (Богомолов В.В. и др., 2017). Поскольку гамма-всплески земного происхождения характеризуются относительно малыми длительностями (<1 мс), для их отбора использовались данные, полученные в режиме пособытийной записи, когда для каждого случая регистрации гамма-кванта фиксировалось время детектирования и определялось энерговыделение в каждом сцинтилляционном кристалле прибора. В таком



рисунки 2. Распределение гамма-квантов при пособытийной записи (а) и временной профиль (б) для кандидата в TGF № 4 (18.09.2014, 10.15.34 UTC). Всплеск на диаграмме «энергия – время» отмечен стрелкой

режиме в приэкваториальных областях гамма-кванты регистрировались практически без потерь, что также благоприятствовало поиску гамма-всплесков земного происхождения, так как они наблюдаются в основном над областями активного грозообразования, т.е. именно в приэкваториальных регионах.

Для отбора гамма-всплесков использовалось условие значимого превышения среднего фоновой счёта на временном интервале 1 мс одновременно не менее чем в двух детекторах. Поскольку TGF характеризуются жёстким спектром, было принято решение рассматривать для поиска кандидатов только события с энерговыделением >400 кэВ, включая те, для которых энерговыделение превышало верхний предел энергетического диапазона.

В результате было отобрано множество возрастных, однако большинство из них оказалось связанными с регистрацией тяжёлых заряженных частиц галактических космических лучей. После исключения возрастных интенсивности, связанных с регистрацией тяжёлых заряженных частиц, остались собственно кандидаты в гамма-всплески земного происхождения. Всего было отобрано пять надёжных событий, которые интерпретировались как TGF (Богомолов В.В., 2017). Одно из таких событий изображено на рисунке 2.

Был также проведён отбор кандидатов в гамма-всплески земного происхождения по более «мягкому» критерию, не включавшему требование совпадения значимых возрастных интенсивности в нескольких детекторах. Согласно этому критерию отбирались события, для которых в отдельном детекторе за 400 мкс регистрировалось не менее пяти гамма-квантов в экваториальных областях и не менее семи в полярных. В приэкваториальных областях было отобрано несколько десятков событий, которые могут рассматриваться как кандидаты в TGF.

Что касается полярных областей, то для данных, полученных с помощью детектора ДРГЭ-11, для которого время экспозиции было наибольшим, большинство возрастных в полярных областях были имитациями всплесков тяжёлыми заряженными частицами космических лучей, и только одно, зарегистрированное 22.11.14 в 05:05:03 UT, может рассматриваться как кандидат в гамма-всплески. Это событие наблюдалось над Антарктидой. Среди событий, отобранных по более жёсткому критерию, также одно было зарегистрировано над Антарктидой (77.6° южной широты).

Высокоширотные кандидаты заслуживают отдельного обсуждения. По сравнению с другими кандидатами в TGF эти события отличаются большей длительностью ~ 2.5 мс. Большую длительность событий можно было бы объяснить рождением короткоживущих изотопов в материале детектора под воздействием энергичных заряженных частиц.

Но при регистрации заряженных частиц на диаграмме «энерговыделение – время» должен присутствовать характерный «хвост», что в случае рассматриваемых событий не наблюдается. Альтернативное объяснение может заключаться в том, что имело место два последовательных, перекрывающихся во времени TGF. В качестве возможного фактора имитации гамма-всплесков могут также рассматриваться релятивистские электроны. Однако в каналах детектирования электронов никаких значимых возрастных во время регистрации всплесков не наблюдалось. Хотя однозначно определить природу этих кандидатов пока не удалось, формальных оснований вычеркнуть высокоширотные всплески из числа кандидатов в TGF нет. Если эти кандидаты будут подтверждены как TGF при последующем анализе данных, то впервые будет обнаружена TGF-активность в высоких широтах, вероятно, не связанная с грозовой активностью.

5. Результаты наблюдений УФ-вспышек из атмосферы Земли

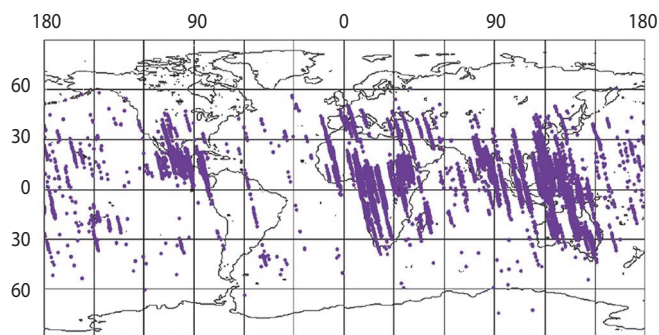
По данным спутника «ВЕРНОВ» с помощью прибора ДУФ было зарегистрировано более 8500 УФ-вспышек из атмосферы Земли. Зарегистрированные вспышки имеют разнообразную временную структуру. Условно их можно разделить на несколько типов:

- короткие одиночные всплески свечения в УФ-и ИК-диапазонах длительностью менее 3 мс;
- повторяющиеся короткие всплески;
- длительные «яркие» (с большим числом фотонов) события, имеющие сложную временную структуру.

Интересно отметить, что большинство вспышек принадлежит к первым двум типам, их доля составляет 62% от общего числа зарегистрированных событий.

Географическое распределение УФ-вспышек, наблюдавшихся в эксперименте на спутнике «ВЕРНОВ» изображено на рисунке 3.

Полученное географическое распределение демонстрирует те же тенденции, что ранее были



рисунк 3. Географическое распределение УФ-вспышек по данным спутника «ВЕРНОВ»

получены на спутнике «ТАТЬЯНА-УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-2»: большинство событий наблюдается над континентами вблизи экватора, т.е. они генетически связаны с самыми активными грозовыми областями (южная часть Северной Америки, Африка, Индия, Индонезия и Австралия), хотя имеются события и над океанами, и на высоких широтах. При этом события с малым числом фотонов, статистика которых по данным спутника «ВЕРНОВ» в сравнении с данными «ТАТЬЯНА-УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-2» существенно выше, распределены более равномерно по долготам и широтам. Такие события часто встречаются на высоких широтах и, как правило, относятся к первому типу, т.е. регистрируются по одному.

Так же, как и на спутнике «ТАТЬЯНА-УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-2» более интенсивные вспышки часто регистрировались сериями вдоль траектории полёта спутника (длительность серий могла достигать 15 минут). Но в данных спутника «ТАТЬЯНА-УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-2» не было сведений о том, что происходит в минутном интервале между вспышками серии. На спутнике «ВЕРНОВ» за счёт уменьшения периода записи от 1 мин до 4.5 с выяснилось, что минутные интервалы в активных грозовых областях заполнены большим количеством миллисекундных вспышек. Было замечено, что в длинных сериях

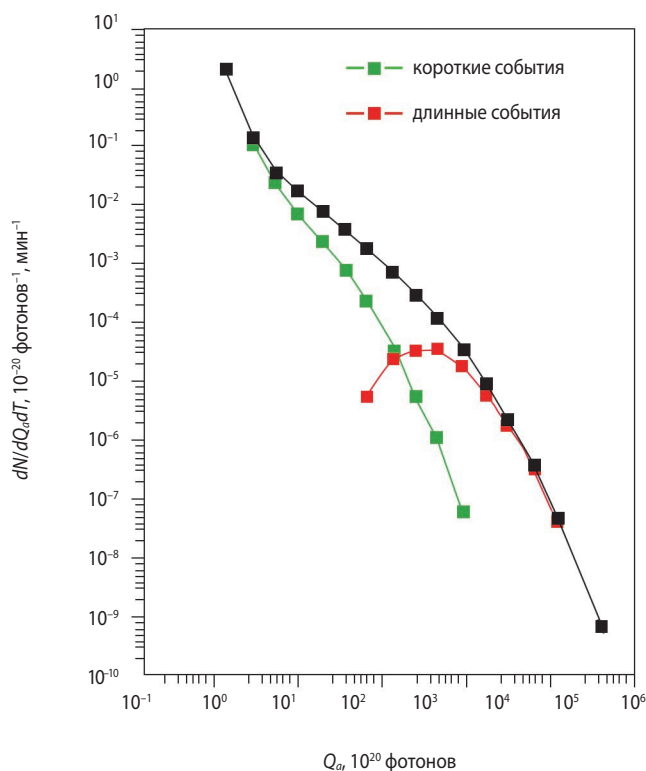
при пролётах над облачным, а затем безоблачным районом регистрация серии вспышек не прерывается, как это следовало бы ожидать при отборе только молниевых разрядов в грозовых районах. Эти данные указывают на существование оптических вспышек, не связанных с грозовой активностью (внегрозовые события) (Klimov P.A. et al., 2018). Поиск событий вдали от грозовых областей показал, что доля внегрозовых событий может достигать ~10–20% от регистрируемых УФ-вспышек. Наблюдение внегрозовых событий является, по-видимому, одним из наиболее важных результатов, полученных в эксперименте на спутнике «ВЕРНОВ».

Было также получено распределение событий по числу фотонов (энергетическое распределение), которое приведено на рисунке 4. На нём отдельно изображены распределения для всех событий, коротких (длительностью менее 3 мс) и длинных. Очевидно, что максимальную суммарную энергию имеют длинные события, и они определяют форму распределения при больших числах фотонов.

В представленном распределении приведены минимальные оценки энергии событий, поскольку, во-первых, предполагается, что события произошли в центре поля зрения (эффективная площадь детектора максимальна в этом направлении) и, во-вторых, не учтена особенность триггерной системы – отбор максимального события за один период регистрации (4.5 с). Таким образом, энергия, выделяемая в одном событии, только в УФ-диапазоне может достигать сотен мегаватт, а полная электромагнитная энергия ещё на порядок выше.

Следует отметить наблюдения УФ-вспышек без сигнала в красном диапазоне, т.е. события, в которых сигнал в красном канале не изменяется по сравнению с шумом, в то время как в УФ наблюдается значительное (более 5σ в соответствии с условием отбора событий) превышение фона. Эти события представляют особый интерес в связи с тем, что в спектре излучения молниевых разрядов, как и для большинства транзиентных явлений в верхних слоях атмосферы существенная доля излучения приходится на красный диапазон (600–800 нм).

События, характеризующиеся излучением только в ультрафиолете, следует отнести к относительно малым высотам грозовых облаков, где происходят не только сами молниевые разряды, но и их «предшественники», прокладывающие канал для будущего возвратного удара молнии. На этих же высотах развиваются также TLE типа голубых струй. Изучение предшественников молний может быть интересным для понимания происхождения молний в разных вариантах состояния атмосферы. Это интересное наблюдение стало возможным, благодаря уменьшению порога регистрации вспышек на спутнике «ВЕРНОВ».



рисунк 4. Распределение УФ-вспышек по числу фотонов по данным спутника «ВЕРНОВ» с учётом времени экспозиции. Чёрным цветом показаны все зарегистрированные события, зелёным – короткие события длительностью менее 3 мс, красным – длинные

6. Результаты наблюдений высыпаний субрелятивистских электронов вблизи полярной границы внешнего радиационного пояса

Одним из важных результатов экспериментов на спутнике «ВЕРНОВ» в плане изучения вариаций потоков субрелятивистских электронов в ОКП стало наблюдение высыпаний таких электронов вблизи полярной границы внешнего радиационного пояса, поскольку понимание механизмов вариаций потоков и спектров релятивистских и субрелятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли на высотах до 1000 км во время геомагнитных возмущений разной интенсивности, как экстремально сильных, так и слабых, на сегодняшний день остаётся одной из наиболее актуальных проблем космической погоды (Богомолов А.В. и др., 2017).

Приведённые исследования показывают наличие двух типов высыпаний: на высокоширотном крае внешнего радиационного пояса (полоса электронных высыпаний) и в области захваченной радиации на более низких L -оболочках. Известно, что высыпания электронов на полярной кромке внешнего радиационного пояса играют важную роль в суббуревой динамике магнитосферы, обеспечении условий для формирования полосы повышенной проводимости в ионосфере и генерации системы продольных токов.

Измерения, выполненные на борту КА «ВЕРНОВ» свидетельствуют о регулярном присутствии электронных высыпаний в возмущённой и в спокойной магнитосфере. Согласно (Yahnin et al., 1997), такие высыпания могут быть обусловлены рассеянием на скривлённых магнитных линиях в области плазменного слоя. Наряду с этим, важным источником высыпаний является резонансное взаимодействие частиц с волнами. Традиционно высыпания релятивистских электронов связывают с генерацией свистовых волн и электромагнитных ионно-циклотронных волн в магнитосфере. Следует также отметить наблюдение высыпаний на более низких L -оболочках, на границе плазмосферы, которые могут быть связаны с рассеянием на электростатических волнах в области верхнего гибридного резонанса. Наличие таких высыпаний, как в возмущённые, так и в спокойные периоды свидетельствует о постоянном присутствии в приэкваториальной магнитосфере процессов, связанных с волновой активностью.

7. Результаты исследования потоков субрелятивистских электронов в приэкваториальных областях

Для всего интервала функционирования КА «ВЕРНОВ» (с июля по декабрь 2014 года) была построена карта распределения электронов субрелятивистских

энергий (от ~50 кэВ до нескольких сотен кэВ) на орбитах спутника (~600–800 км), отражающая глобальное распределение потоков таких электронов в ОКП (рисунок 5) (Петров В.Л. и др., 2020). Из рисунка видно, что, помимо зон радиационных поясов и прилегающих к ним областей высыпаний, значимые потоки субрелятивистских электронов существуют в приэкваториальных областях, причём они концентрируются на определённых дрейфовых оболочках, а наблюдающееся долготное распределение обусловлено особенностями конфигурации магнитного поля на высотах орбит КА.

Потоки электронов на малых L -оболочках слабо зависят от уровня геомагнитной активности и параметров межпланетной среды. В целом они должны быть довольно стабильными, однако на $L < 1.2$ из-за стока в ЮАА они не должны существовать более одного дрейфового периода. Как известно, стабильные потоки электронов могут существовать на данной дрейфовой оболочке в тех случаях, когда их время жизни превышает дрейфовый период, то есть можно считать электроны захваченными. Такая ситуация реализуется в основном для оболочек с относительно большим L . Как следует из теории адиабатического движения, раствор конуса потерь стремится к 90° при $L \rightarrow 1$, в результате чего на высотах менее 400–500 км в низкоширотных областях, кроме зоны ЮАА, стабильные потоки заряженных частиц, в том числе электронов, существовать не должны.

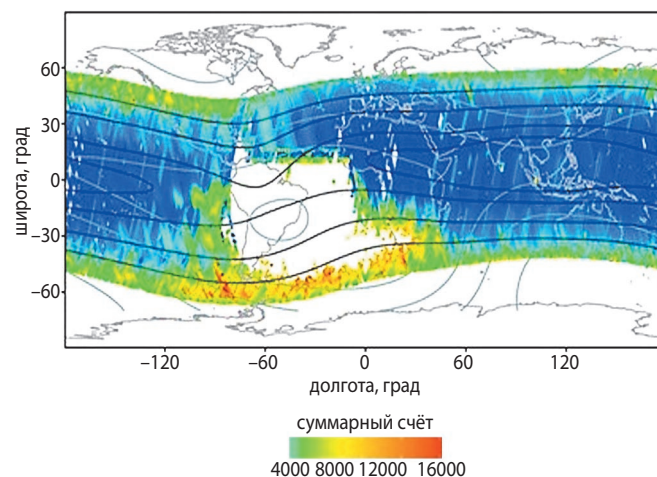


рисунок 5. Карта глобального распределения электронов субрелятивистских энергий на орбитах спутника «ВЕРНОВ». Цветом показан уровень счёта, отражающий интенсивность регистрируемых потоков. Белый цвет соответствует уровням, при которых детекторы прибора были перегружены или же прибор выключался (в области ЮАА). На карте также изображены изолинии напряжённости магнитного поля B (светло-серые линии, B от 0.247 до 0.395 Гс) и параметра L (тёмно-серые линии, $L=1.1, 1.2, 1.5, 2$), построенные по модели IGRF для средней высоты 700 км

Наличие же таких потоков в низкоширотных областях, где время жизни электронов заведомо меньше дрейфового периода, требует предположить, что существуют постоянно действующие механизмы подпитки потоков на этих оболочках. Заполнение некоторых L -оболочек в низкоширотных областях дипольного магнитного поля может быть обеспечено дрейфом с запада на восток электронов, высыпавшихся (вследствие рассеяния на остаточной атмосфере) вдоль восточной периферии ЮАА на дрейфовые оболочки, характеризующиеся значениями МакИлвайна L в среднем меньше типичных для внутреннего пояса. В частности, по-видимому, именно таким механизмом можно объяснить наличие повышенных потоков электронов на $L \sim 1,4$ и $\sim 1,2$, которые наблюдались, в том числе в экспериментах на ОС «Мир» (Богомолов А.В. и др., 2005). Результаты измерений на спутниках «ВЕРНОВ» показывают, что значимые потоки электронов могут существовать и на более «низких» дрейфовых оболочках $L \sim 1.10$ – 1.12 и $L \sim 1.04$ – 1.05 . Из данных, полученных в эксперименте на ИСЗ «ВЕРНОВ», следует, что значимые потоки электронов субрелятивистских энергий существуют на этих оболочках, по крайней мере, в течение месяцев, а с учётом данных измерений на других КА (в частности, спутниках POES) срок их существования может составлять более 10 лет. Это означает, что должны иметь место постоянно действующие механизмы подпитки электронами указанных оболочек. Эксперимент на ИСЗ «ВЕРНОВ» пришёлся на интервал времени, отличавшийся сравнительно низкой геомагнитной активностью, но даже в случае высокой геомагнитной активности трудно придумать механизм, обеспечивающий заброс электронов из областей захваченной радиации на столь малые L поперёк силовых линий магнитного поля. Поэтому более вероятным представляется механизм инжекции электронов «снизу», например, вследствие высотных грозных разрядов, в ходе которых часть ускоренных электронов может выходить в околоземное пространство. В пользу этого может свидетельствовать тот факт, что, как видно из глобального пространственного распределения электронов на малых L (см. рисунок 5), повышенные потоки электронов вблизи геомагнитного экватора «начинают появляться» к востоку от Африки, т.е. в тех областях, куда должны дрейфовать электроны, инжектированные над областями с высокой грозной активностью. При этом количество локальных максимумов интенсивности счета электронов существенно увеличивается в областях над Юго-Восточной Азией, т.е. над регионами также с повышенным грозообразованием.

Творческое сотрудничество коллективов НПОЛ и НИИЯФ МГУ вселяет уверенность в том, что они и в дальнейшем будут вносить весомый вклад в изучение и освоение космоса.

список литературы

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. С. 322–329.

Богомолов А.В., Мягкова И.Н., Калегаев В.В. и др. Высыпания электронов субрелятивистских энергий вблизи полярной границы внешнего радиационного пояса Земли по данным экспериментов на спутниках «ВЕРНОВ» и «ЛОМОНОСОВ» // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 6. С. 459–470.

Богомолов В.В., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и др. Наблюдение гамма-всплесков земного происхождения в космическом эксперименте РЭЛЕК на спутнике «ВЕРНОВ» // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 3. С. 169–178.

Петров В.Л., Богомолов А.В., Богомолов В.В. и др. Пространственные и временные характеристики потоков электронов субрелятивистских энергий в околоземном космическом пространстве по данным спутника «ВЕРНОВ» // Геомагн. и аэрон. 2020. Т. 60, № 2. С. 153–163.

Хартон В.В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 3–11.

Dwyer J.R., Smith D.M., Cummer S.A. High-energy atmospheric physics: Terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena // Space Sci. Rev. 2012. Vol. 173. P. 133–196.

Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. 1992. Vol. 165. P. 463–468.

Klimov P.A., Kaznacheeva M.A., Khrenov B.A. et al. UV Transient Atmospheric Events Observed Far From Thunderstorms by the Vernov Satellite // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Publ. Institute of Electrical and Electronics Engineers (USA). 2018. Vol. 15, № 8. P. 1139–1143.

Yahnin A.G., Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B., Vennerström S. Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of energetic particles // Ann. Geophys. 1997. Vol. 15. P. 943–958.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024

Статья после доработки 13.01.2025

Статья принята к публикации 13.01.2025