

**Богомоллов А.В., Денисов Ю.И.,  
Колесов Г.Я., Кудрявцев М.И.,  
Логачев Ю.И., Морозов О.В.,  
Свертилов С.И.**

**ПОТОКИ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ  
ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ  $>0.08$  МЭВ  
НА ДРЕЙФОВЫХ ОБОЛОЧКАХ  $L < 2$  НА  
ОРБИТАХ СТАНЦИИ «МИР»**

Препринт НИИЯФ МГУ 2005-9/775

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

**Богомолов А.В., Денисов Ю.И.,  
Колесов Г.Я., Кудрявцев М.И.,  
Логачев Ю.И., Морозов О.В.,  
Свертилов С.И.**

**ПОТОКИ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ  
ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ  $>0.08$  МЭВ  
НА ДРЕЙФОВЫХ ОБОЛОЧКАХ  $L < 2$  НА  
ОРБИТАХ СТАНЦИИ «МИР»**

Препринт НИИЯФ МГУ 2005-9/775

УДК 891.53.21.31  
ББК

**Bogomolov A.V., Denisov Yu.I., Kolesov G.Ya., Kudryavtsev M.I., Logachev Yu.I.,  
Morozov O.V., Svertilov S.I.**

E-mail: sis@coronas.ru

**THE FLUXES OF QUASITRAPPED ELECTRONS WITH ENERGIES  $>0.08$  MeV IN  
THE ON DRIFT SHELLS  $L < 2$  AT THE MIR STATION ORBITS.**

Preprint INPH MSU 2005-9/775

**Abstract**

The results of GRIF experiment on board the "Spectr" module of "Mir" orbital station concerning to the study of fluxes of electrons with energies  $>80$  keV are presented in this manuscript. The number of instruments included detectors of electrons, protons and nuclei with large and small geometric factor, that allowed to measure high charge particle fluxes in the Earth's radiation belts as well as low electron fluxes at the regions near the geomagnetic equator. The parameters of electron fluxes observed during the all time of experiment from October, 1995 to June, 1997 in the near-Earth space on the drift shells  $L = 1.7, 1.4, 1.1$  are analyzed. The geographic maps, on which electron flux distributions on the station orbit altitude (400 km) are shown, and the spectral estimations indicate on that the most probable source on the shells  $L < 1.5$  is the South-Atlantic Anomaly. By this the stable enrichment of  $L$ -shells with  $L = 1.7, 1.4, 1.1$  may be caused by the scattering in the remnant atmosphere of the inner radiation belt electrons precipitating near the South-Atlantic Anomaly.

**Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я., Кудрявцев М.И.,  
Логачев Ю.И., Морозов О.В., Свертилов С.И.**

E-mail: sis@coronas.ru

**ПОТОКИ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ  $>0.08$  МЭВ НА  
ДРЕЙФОВЫХ ОБОЛОЧКАХ  $L < 2$  НА ОРБИТАХ СТАНЦИИ «МИР»**

Препринт НИИЯФ МГУ 2005-9/775

**Аннотация**

В работе представлены данные эксперимента ГРИФ на модуле "Спектр" космической станции "Мир" по изучению потоков электронов с энергиями  $>80$  кэВ. Комплекс аппаратуры содержал детекторы электронов, протонов и ядер с большим и малым геометрическими факторами, что позволяло проводить как измерения потоков заряженных частиц в области радиационных поясов Земли, так и измерения малых потоков электронов в областях, близких к геомагнитному экватору. В работе исследуются характеристики потоков электронов в областях околоземного пространства, соответствующих дрейфовым оболочкам  $L = 1.7, 1.4, 1.1$ , наблюдавшиеся в течение всего времени эксперимента с октября 1995 г. по июнь 1997 г. Полученные географические карты распределения потоков электронов на высоте полета станции (400 км), а также оценки спектров указывают, что наиболее вероятным источником электронов на оболочках  $L < 1.5$  является Южно-Атлантическая аномалия. При этом механизм стабильного пополнения оболочек с  $L = 1.7, 1.4, 1.1$  может быть связан с рассеянием в остаточной атмосфере электронов внутреннего радиационного пояса, выпадающих в районе Южно-Атлантической аномалии.

© Богомолов А.В. и др., 2005

© НИИЯФ МГУ, 2005

## 1. Введение.

За более чем 40-летнюю историю экспериментального изучения частиц радиационных поясов Земли накоплен обширный наблюдательный материал [1 - 4]. Достаточно хорошо изучены механизмы устойчивого существования, пополнения и гибели частиц радиационных поясов [5 - 8]. В то же время некоторые проблемы остаются нерешенными. В частности, нет достаточно полной картины динамики потоков частиц, в том числе электронов субрелятивистских и релятивистских энергий на малых высотах («под радиационными поясами») в областях, соответствующим малым значениям  $L$  ( $< 1.5$ ).

Как следует из теории, радиационные пояса являются результатом накопления энергичных частиц в областях захвата геомагнитной ловушки. В этих областях, в отсутствие внешних возмущений, заряженные частицы могут находиться сколь угодно долго, осциллируя между северными и южными точками отражения и дрейфуя вдоль соответствующих  $L$ -оболочек.

В реальном геомагнитном поле к областям захвата примыкают так называемые области «квазизахвата», где частицы захватываются на относительно короткое время - время порядка одного дрейфового оборота вокруг Земли. В областях, близких к внешней магнитосфере ( $L > 5$ ), квазизахват обусловлен попаданием электронов на траектории вдоль незамкнутых силовых линий, выдуваемых солнечным ветром. Во внутренней магнитосфере ( $L < 1.5$ ) по аналогии можно рассматривать квазизахваченными те частицы, которые при окончании дрейфового оборота попадают в область Южно-Атлантической магнитной аномалии и там существенно меняют характер движения.

В соответствии с вышесказанным, представляется, что на высотах менее 400-500 км в низкоширотных областях, кроме районов, примыкающих к Южно-атлантической аномалии, не должны наблюдаться стабильные потоки заряженных частиц. В то же время известно, что на дрейфовых оболочках с малыми значениями  $L$  наблюдались долговременные устойчивые потоки электронов, образованные в результате высотных ядерных взрывов, осуществленных в США и СССР в конце 50-х – начале 60-х годов XX века [4]. Так, в результате высотного ядерного взрыва Starfish (9 июля 1962 г.) наблюдались значительные

потоки электронов с энергиями  $\geq 5$  МэВ в области с  $L = 1.2 - 1.6$  и вблизи  $L = 1.8$  [9, 10]. При этом, по данным эксперимента на спутнике Inguine-1 значимые потоки электронов наблюдались в областях  $1.175 < L < 1.195$ ,  $0.19 \text{ Гс} < B < 0.22 \text{ Гс}$  и  $L = 1.25$ ,  $0.18 \text{ Гс} < B < 0.22 \text{ Гс}$  в ноябре 1962 г., то есть спустя 4 месяца после момента инъекции [11], хотя предсказываемое теорией характерное время жизни квазизахваченных релятивистских электронов в таких областях не должно существенно превосходить их дрейфовый период, составляющий порядка минут [6].

На сегодняшний день, после того как искусственные радиационные пояса распались, имеется относительно мало данных о естественных потоках захваченных или квазизахваченных электронов высоких энергий в низкоширотных областях под внутренним радиационным поясом. Это обусловлено малыми величинами потоков, что требует использования детекторов с достаточно большим геометрическим фактором, в то время как большинство проведенных экспериментов было ориентировано на изучение очень больших потоков захваченных частиц именно в радиационных поясах, для чего использовались детекторы с малым геометрическим фактором [12 - 14].

Среди имеющихся результатов в этой области следует отметить обнаружение в эксперименте на спутнике OHZORA в диапазоне высот 350-800 км низкоширотных зон регистрации повышенного счета электронов с энергиями  $E_e = 0.19 - 3.2$  МэВ. Эти зоны соответствуют  $L = 1.71 \pm 0.16$ , наблюдающиеся в них потоки электронов интерпретируются авторами эксперимента OHZORA как высыпания из внутреннего радиационного пояса [15]. Однако к настоящему времени нет достаточно полной информации о пространственной структуре потоков электронов субрелятивистских энергий в областях, соответствующих меньшим  $L$ , особенно в районе экватора под радиационными поясами ( $L < 1.5$ ), и об их динамике.

Изучение пространственного распределения электронов с энергиями в десятки - сотни кэВ на низких высотах и широтах имеет значение не только для понимания динамики радиационных поясов и механизмов высыпаний электронов. Новые данные о потоках электронов в околоземном пространстве важны и для решения ряда прикладных задач, в частности, контроля радиационного фона во время космических

миссий. В этом плане особо следует отметить важность информации о распределении потоков сопутствующих заряженных частиц при рентгено и гамма-астрономических наблюдениях на околоземных космических аппаратах, поскольку кратковременные высыпания электронов могут имитировать (через генерацию тормозного излучения) некоторые астрофизические явления, например, космические гамма-всплески.

В ходе многоцелевого эксперимента с комплексом научной аппаратуры ГРИФ на борту орбитальной станции "Мир" были получены новые данные о популяции электронов с энергиями порядка десятков - сотен кэВ на низких  $L$ -оболочках ( $L < 1.5$ ) под радиационными поясами Земли.

## 2. Эксперимент.

С октября 1995 г. по июнь 1997 г. на модуле "Спектр" орбитальной станции "Мир" проводился многоцелевой эксперимент ГРИФ [16]. Орбита станции характеризовалась следующими параметрами: высота  $\sim 400$  км, период обращения  $\sim 90$  мин и наклонение  $\sim 51^\circ$ . Комплекс аппаратуры ГРИФ включал два детектора-спектрометра заряженных частиц (главным образом электронов и протонов):

- "Фон-1" (диапазоны энергий регистрируемых электронов  $\Delta E_e = 0.04 - 0.08, 0.08 - 0.16, >0.2$  МэВ; диапазоны энергий регистрируемых протонов  $\Delta E_p = 1.0 - 1.5, 1.5 - 3, 3 - 10$  МэВ; геометрический фактор  $\Gamma \sim 80 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ ).
- "Фон-2" ( $E_e > 0.04, > 0.1$  МэВ,  $\Delta E_e = 0.15 - 0.3, 0.3 - 1.5$  МэВ;  $\Delta E_p = 2 - 5, 5 - 20, 20 - 50, 50 - 100, 100 - 200$  МэВ;  $\Gamma \sim 0.7 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ ).

Прибор "Фон-1" состоял из двух идентичных фосвич-детекторов, каждый из которых представлял собой тонкий ( $\sim 50$  мкм) слой сцинтиллятора CsI(Tl), напыленного на диск из пластмассового сцинтиллятора (на основе полистирола) толщиной 0.5 см и диаметром 8 см. Оба сцинтиллятора просматривались одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Со стороны входного окна сцинтиллятор CsI(Tl) был закрыт тонкой алюминиевой фольгой (толщиной  $\sim 10$  мкм). С целью повышения чувствительности прибора, формирования его направленности, а также для выравнивания энергетических потерь в сцинтилляторе CsI(Tl) частиц одной энергии, входные

траектории падающих частиц были ограничены коллиматором, установленным над сцинтиллятором CsI(Tl) и фольгой из Al. Коллиматор обеспечивал попадания регистрируемых частиц на детектор в пределах  $\pm 30^\circ$  от его оси.

Регистрация электронов и протонов, попадавших в поле зрения детектора, осуществлялась, в основном сцинтиллятором CsI(Tl). Защитная алюминиевая фольга толщиной  $\sim 10$  мкм предохраняла детектирующий элемент от света, при этом в ней поглощались электроны с энергиями менее 0.04 МэВ и протоны и ядра с энергиями менее 1 МэВ/нуклон. Толщина слоя сцинтиллятора CsI(Tl)  $\sim 50$  мкм соответствует полной длине пробега электронов с начальной энергией  $\sim 0.2$  МэВ, и протонов и ядер с начальной энергией 3 МэВ/нуклон. Электроны и протоны больших энергий могли проникать сквозь слой сцинтиллятора CsI(Tl) и попадать в пластмассовый сцинтиллятор, что вызывало появление сигнала антисовпадений (пластмассовый сцинтиллятор также использовался в качестве активной защиты для исключения регистрации заряженных частиц, попадавших в детектор вне его поля зрения). Таким образом, полный энергетический диапазон регистрируемых электронов составлял от 0.04 МэВ до более чем 0.2 МэВ, причем в диапазоне от 0.04 МэВ до 0.2 МэВ регистрация осуществлялась по полному поглощению в CsI(Tl), а в диапазоне энергий свыше 0.2 МэВ по энерговыделениям в пластмассовом сцинтилляторе. Для протонов соответствующие диапазоны были 1 - 3 и  $>3$  МэВ.

Разделение сигналов от пластмассового сцинтиллятора и CsI(Tl) было реализовано на основе анализа временной формы выходного сигнала ФЭУ методом фосвича, который основан на использовании различия времен высвечивания CsI(Tl) ( $\sim 1$  мкс) и пластмассового сцинтиллятора ( $\sim 10$  нс). Идентификация электронов и протонов, регистрируемых сцинтиллятором CsI(Tl), осуществлялась путем амплитудного анализа выходных сигналов ФЭУ (в случае полного поглощения в слое CsI(Tl) энерговыделение протонов и ядер более чем на порядок превосходит энерговыделение электронов).

Прибор "Фон-2" состоял из двух идентичных пар полупроводниковых телескопов и двух пар счетчиков Гейгера (с уровнями пороговой энергии 0.04 и 0.1 МэВ). Каждый телескоп имел два "тонких" (0.02 см) – " $\Delta E$ " и один "толстый" (0.2 см) – " $E$ " кремниевых детектора. Электроны и протоны разделялись с

помощью стандартной антисовпадательной техники путем " $\Delta E/E$ " анализа. В качестве счетчиков Гейгера использовались стандартные торцевые счетчики СИ-19БГ, входное окно одного из которых было закрыто алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм, что обеспечило более высокий уровень пороговой энергии.

Блоки детектирования приборов "Фон-1" и "Фон-2" были расположены снаружи станции. Оси приборов "Фон-1" и "Фон-2" были ориентированы вдоль главной оси станции, которая в штатном режиме была ориентирована в местный зенит. Оба прибора работали в режиме непрерывных измерений. В большинстве случаев выходные показания в каналах приборов (скорости счета) приборов передавались каждые 5 с., а в некоторых случаях - каждые 0.6 с.

В эксперименте также имелась возможность регистрировать электроны высоких энергий, вплоть до десятков МэВ, по их тормозному излучению. Для этого использовались данные всенаправленного гамма-спектрометра НЕГА (диапазон энергий регистрируемых гамма-квантов  $\Delta E_\gamma = 0.05 - 0.15, 0.15 - 0.5, 0.5 - 1.5, 1.5 - 5, 5 - 15, >15$  МэВ; эффективная площадь  $S_{\text{эфф}} \sim 250 \text{ см}^2$ ), также входившего в состав аппаратуры ГРИФ [17]. Прибор состоял из четырех одинаковых блоков детектирования, установленных внутри гермоотсека станции. Каждый блок содержал сцинтиллятор - кристалл CsI(Tl) (диаметром 10 см и толщиной 10 см), который был помещен в антисовпадательный колпак из пластмассового сцинтиллятора толщиной 2 см. Оба сцинтиллятора просматривались одним ФЭУ. Исключение заряженных частиц, к которым относились события, сопровождавшиеся высвечиванием пластмассового сцинтиллятора, осуществлялось путем анализа формы входного импульса ФЭУ (фосвич).

### 3. Результаты.

Типичная орбита станции "Мир" и основные факторы, определяющие результаты эксперимента, схематически, без строгого соблюдения масштабов, проиллюстрированы на рис. 1.

Основная информация о потоках электронов в областях, соответствующих  $L < 2$  вне Южно-атлантической аномалии, была получена с помощью прибора "Фон-1". Благодаря большому геометрическому фактору ( $\sim 80 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ ) он имел сравнительно высокую чувствительность:  $5\sigma$ -уровень значимой регистрации потоков электронов в диапазоне энергий

>200 кэВ соответствовал  $\sim 1$  част./см<sup>2</sup>·с.ср. Вместе с тем в районе Южно Атлантической аномалии (ЮАА) прибор "Фон-1", как правило, был перегружен большими потоками присутствующих там частиц, информация о которых получалась с помощью других приборов комплекса.

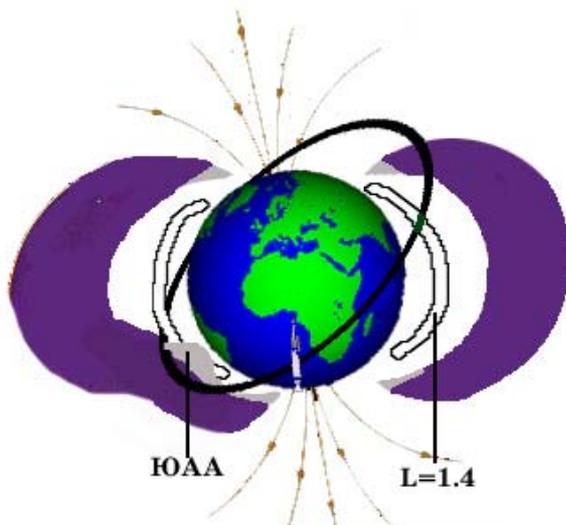


Рис. 1. Схематичное изображение зон высокой концентрации захваченных и квазизахваченных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, пересекаемых орбитой (черная линия) станции «Мир». Изображено сечение внутреннего радиационного пояса электронов плоскостью магнитного меридиана, проходящего через Южно-атлантическую аномалию. Темным цветом показаны области устойчивого захвата, серым цветом – зоны высыпаний. Отмечена также дрейфовая оболочка, соответствующая  $L = 1.4$ .

На рис. 2 представлены выходные показания (скорости счета) в каналах регистрации электронов и протонов приборов "Фон-1" и "Фон-2", полученные вдоль типичной орбиты в течение  $\sim 1.5$  часа (практически за один период обращения) наблюдений 5 октября 1995 г. (проекция этого витка орбиты в географических координатах изображена на рис. 3). Изменение скоростей счета электронов и протонов соответствует прохождению станцией различных областей околоземного пространства. Начало измерений соответствует нисходящей ветви орбиты, по которой станция переходит из северного в южное полушарие, пересекая геомагнитный экватор в момент времени  $\sim 20^{\text{h}}45^{\text{m}}$  УТ. При пересечении геомагнитного экватора наблюдается минимум

скоростей счета в каналах регистрации субрелятивистских электронов прибора "Фон-1". В южном полушарии траектория станции на рассматриваемом витке пересекала восточную периферию Южно-атлантической аномалии ( $21^{\text{h}}10^{\text{m}} - 21^{\text{h}}20^{\text{m}}$  UT), в которой прибор "Фон-1" был перегружен большими потоками частиц и фактически не работал. Напротив, прибор "Фон-2" благодаря малому геометрическому фактору давал достоверные показания. После выхода из аномалии станция вновь пересекла геомагнитный экватор ( $\sim 21^{\text{h}}40^{\text{m}}$  UT) и ушла в северное полушарие.

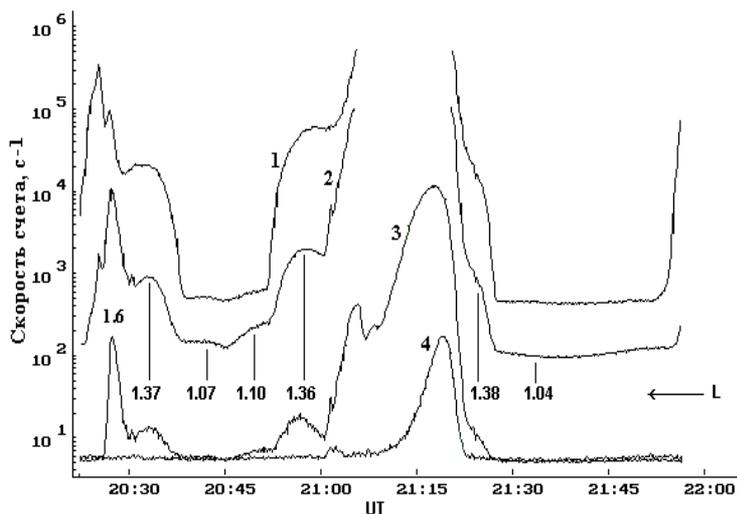


Рис. 2. Зависимость скоростей счета в выходных каналах приборов "Гриф-1" от времени (один виток, 5 октября 1995 г.), иллюстрирующая существование повышенных потоков электронов на различных  $L$ . 1-электроны с  $E = 0.08-0.16$  МэВ ("Фон-1"); 2-электроны с  $E > 0.2$  МэВ ("Фон-1"); 3-сумма электронов с  $E = 0.15-0.3$  МэВ и протонов с  $E = 2-5$  МэВ ("Фон-2"); 4-электроны с  $E=0.3-1.5$  МэВ ("Фон-2").

Следует обратить внимание на наличие во временном ходе скоростей счета электронов в каналах 80 - 160 и  $>200$  кэВ прибора "Фон-1" некоторой структуры, проявляющейся в виде максимумов, соответствующих  $L \sim 1.36 - 1.38$  и  $L \sim 1.6$ . Особенно следует отметить симметричный (относительно геомагнитного экватора) характер пиков при  $L \sim 1.36 - 1.37$ . Если принять показания в каналах прибора "Фон-1" в области геомагнитного экватора за уровень аппаратного шума, то

можно заметить, что хотя и малые, но вполне значимые потоки электронов

( $\sim 0.2 - 0.5$  част./см<sup>2</sup>·с·ср и  $\sim 1$  част./см<sup>2</sup>·с·ср в диапазонах 80-160 и  $>200$  кэВ, соответственно) регистрировались также при  $L < 1.2$ . Причем в области  $L \sim 1.07 - 1.10$  во временном ходе скоростей счета также наблюдается структура, симметричная относительно геомагнитного экватора.

Наличие подобных структур может быть связано с пересечением орбитой станции дрейфовых оболочек, отличающихся повышенной концентрацией электронов.

Для проверки этого предположения данные прибора "Фон-1" были проанализированы за все время эксперимента для разных интервалов наблюдений. Помимо рассмотренных выше измерений в октябре 1995 г. были взяты наблюдения, проводившиеся в ноябре 1995 г. – марте 1996 г., с октября 1996 г. по начало января 1997 г., а также в июне 1997. При этом рассматривались только такие промежутки времени, в течение которых геомагнитная обстановка была относительно спокойной ( $K_p < 3$ ) [18]. Во временных рядах скоростей счета в каналах регистрации электронов 80 - 160 и  $>200$  кэВ прибора "Фон-1" выделялись структуры типа пиков (кроме возрастаний, регистрировавшихся при пересечении Южно-атлантической аномалии и отрогов внешнего радиационного пояса на относительно высоких широтах  $L > 2.5$ ), для максимумов которых определялись географические и геомагнитные ( $L$ ,  $B$  - модель геомагнитного поля IGRF 1990 [19]) координаты места измерения. В качестве критерия отбора было выбрано условие, чтобы во временном ходе показаний прибора пик прописывался не менее чем 12 точками, то есть длительность возрастания была  $>1$  мин, что соответствует прохождению области с повышенной концентрацией электронов, размеры которой более  $\sim 500$  км (около  $3^\circ$  по широте).

Путем проведенного таким образом статистического отбора было выделено три группы пиковых структур, максимумы которых соответствуют дрейфовым оболочкам, характеризуемым значениями  $L$ :  $\sim 1.75$ ,  $1.4$  и  $1.1$ . Первая группа, по-видимому, связана с теми же явлениями, что и наблюдавшиеся на спутнике OHZORA возрастания потоков электронов при  $L \sim 1.7$  [15]. Однако в плане исследования устойчивых потоков захваченных и квазизахваченных электронов на дрейфовых оболочках в области малых значений

$L$  большой интерес представляют именно группы пиков, относящиеся к  $L \sim 1.4$  и  $L \sim 1.1$ .

На рис. 3 изображена географическая карта поверхности Земли, на которую спроецированы положения максимумов (отмечены крестиками, квадратиками и кружочками) пиковых структур, которые прослеживаются во временных показаниях каналов регистрации электронов прибора "Фон-1". На этом рисунке также отмечено географическое положение области пересечения ЮАА орбитами станции «Мир», в которой по показаниям прибора "Фон-2" регистрировались значимые потоки протонов ( $> 10 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ,  $E_p > 100 \text{ МэВ}$ ), и электронов ( $> 15 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ,  $E_e = 0.3 - 1.5 \text{ МэВ}$ ), а также повышенные (по сравнению с широтным ходом) скорости счета гамма-квантов в канале  $> 15 \text{ МэВ}$  прибора НЕГА. Как видно из рисунка, области регистрации больших потоков электронов ( $L = 1.1 - 2.2$ ,  $B < 0.3 \text{ Гс}$ ) и протонов ( $L = 1.1 - 1.5$ ,  $B < 0.24 \text{ Гс}$ ) практически совпадают с областями захваченной радиации в районе Южно-атлантической аномалии по данным [20], при этом область возрастания гамма-излучения в канале  $> 15 \text{ МэВ}$  ( $L = 1.1-2.2$ ,  $B < 0.28 \text{ Гс}$ ) почти соответствует зоне регистрации энергичных электронов и шире зоны протонов.

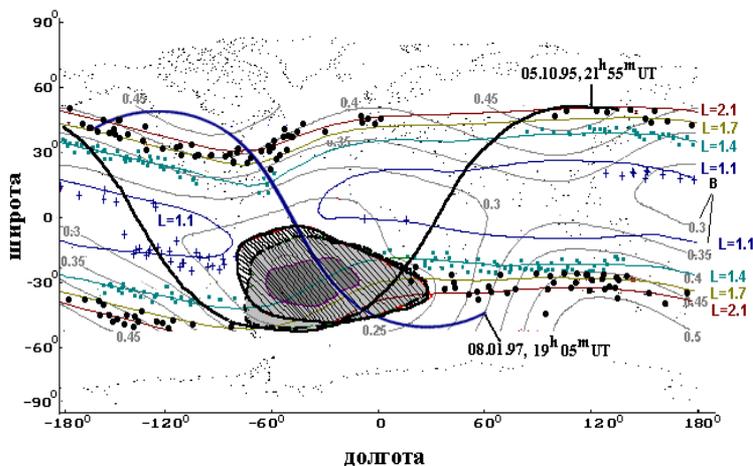


Рис.3. Географическое положение областей регистрации высокоэнергичных протонов ( $E_p > 100 \text{ МэВ}$ , темно серый цвет), электронов ( $E_e = 0.3 - 1.5 \text{ МэВ}$ , серый цвет) и гамма-квантов (заштриховано) в районе Южно-атлантической аномалии, а также зон квазизахваченных электронов на  $L = 1.1, 1.4$  и  $1.7$ . Крестиками отмечены положения максимумов скоростей счета электронов

( $E_e = 0.08 - 0.16$  МэВ) по данным прибора "Фон-1" на  $L < 1.25$ ; квадратиками - на  $L = 1.25 - 1.55$ ; точками - на  $L > 1.55$ . Изображены проекции орбиты станции, соответствующие временным интервалам  $20^h20^m - 21^h55^m$  UT, 05.10.1995 (профили скоростей счета на рис. 2) и  $18^h00^m - 19^h05^m$  UT, 08.01.1997 (профили скоростей счета на рис. 5), а также линии равных значений  $L$  (темные кривые) и  $V$  (светло серые кривые).

Как видно из рис. 3, максимумы пиковых структур во временных зависимостях скоростей счета электронов, которые связаны с наибольшими величинами потоков, действительно сосредоточены вдоль линий одинаковых значений  $L$ , как в южном, так и в северном полушарии. Это естественным образом может быть объяснено, исходя из того, что полученное пространственное распределение положений максимумов измеряемой интенсивности счета действительно отражает сечение орбитой станции дрейфовых оболочек, на которых наблюдаются устойчивые повышенные потоки электронов.

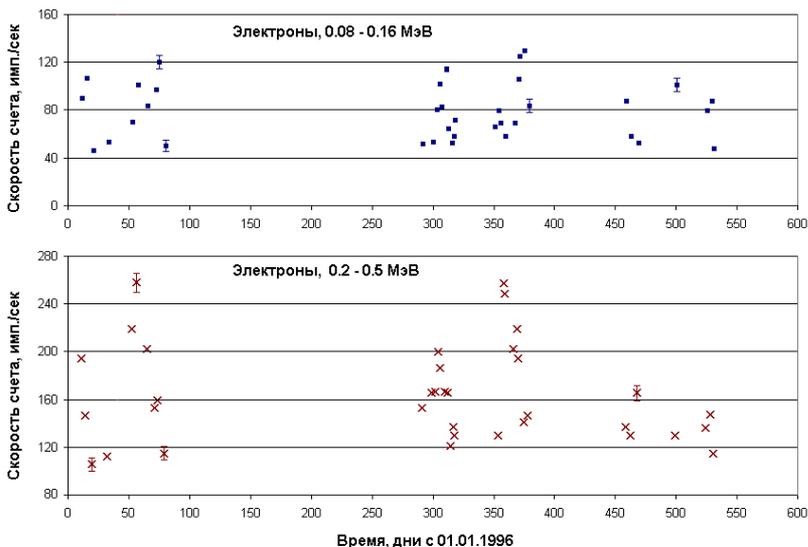


Рис.4. Зависимость от времени скоростей счета электронов в географической области с координатами: широта от  $-25^\circ$  до  $-20^\circ$ , долгота от  $80^\circ$  до  $90^\circ$ .

В качестве иллюстрации долговременного характера существования потоков электронов, наблюдаемых на низких  $L$ -

оболочках, на рис. 4 показана зависимость от времени скоростей счета электронов в узкой географической области ( $80^\circ$  -  $90^\circ$  долготы,  $-25^\circ$  -  $-20^\circ$  широты), соответствующей одному из регионов постоянного наблюдения повышенного счета электронов на оболочке при  $L \sim 1.4$ . Отсутствие экспериментальных точек на значительных интервалах времени вызвано отсутствием информации, а не малостью существующих потоков. В целом картина свидетельствует о том, что, при наличии существенных вариаций интенсивности в коротком масштабе времени, в среднем потоки остаются постоянными.

#### 4. Обсуждение.

Для того, чтобы на заданной дрейфовой оболочке могли существовать стабильные потоки захваченных частиц, время их жизни  $\tau$ , должно, по крайней мере, быть не меньше дрейфового периода:

$$\tau \geq \tau_d. \quad (1)$$

Согласно [6] время жизни захваченной частицы с учетом возможности ее гибели в конусе потерь за счет питч-угловой диффузии определяется соотношением

$$\tau \approx -\tau_b \frac{\ln(\sin \alpha_{\text{потерь}})}{\ln(4/3)}, \quad (2)$$

где  $\tau_b$  – период осцилляции частицы вдоль ведущей силовой линии,  $\alpha_{\text{потерь}}$  – половина угла раствора экваториального конуса потерь:

$$\sin^2 \alpha_{\text{потерь}} = \frac{1}{L^3 (4 - 3/L)^{1/2}}. \quad (3)$$

Для величин  $\tau_b$  и  $\tau_d$  известны следующие выражения [6]:

$$\tau_b = \frac{4R_3}{c} L f(\alpha_0) \beta^{-1}, \quad (4)$$

$$\tau_d = \frac{4\pi e k_3}{3m_e c^2 R_3} \frac{1}{L g(\alpha_0) \beta^2}, \quad (5)$$

где  $k_3$  – величина магнитного дипольного момента Земли,  $R_3$  – радиус Земли,  $m_e$  – масса электрона,  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\beta$  – отношение скорости электрона к

скорости света,  $\gamma$  - Лоренц-фактор электрона,  $f(\alpha_0)$ ,  $g(\alpha_0)$  - некоторые функцииpitch-угла электрона.

Согласно (3) для  $L = 1.4 \sin \alpha_{\text{потерь}} \cong 0.517$ , для  $L = 1.1 \sin \alpha_{\text{потерь}} \cong 0.816$ . Для таких величин угла раствора конуса потерь функции  $f$ ,  $g$  можно считать мало отличающимися от 1 [6], для электронов субрелятивистских энергий также с хорошей точностью можно положить  $\gamma \approx 1$ ,  $\beta \approx 1$ . Тогда из (2), (4), (5) следует, что для  $L = 1.4 \tau \approx 0.3$  с,  $\tau_d \approx 7.3 \cdot 10^3$  с, для  $L = 1.1 \tau \approx 0.07$  с,  $\tau_d \approx 9.3 \cdot 10^3$  с. Таким образом, для рассматриваемых  $L$ -оболочек условие (1) заведомо не выполняется. Тем не менее, как свидетельствует эксперимент ГРИФ, частицы на низких дрейфовых оболочках присутствуют в заметных количествах постоянно, и, следовательно, указанные  $L$ -оболочки магнитного диполя должны постоянно пополняться. Возникает вопрос, каковы источники этих частиц и каким образом они попадают в область квазизахвата.

Определенная подсказка заключена в самих "особых" значениях  $L = 1.4$ ,  $1.1$ . То, что области «максимальных потоков», как следует из рис. 3, примыкают к Южно-атлантической аномалии (особенно явно для  $L \sim 1.4$  и  $L \sim 1.1$ ) позволяет рассмотреть ее в качестве наиболее вероятного источника частиц на этих дрейфовых оболочках.

В пользу выдвинутого предположения свидетельствуют так же некоторые более тонкие пространственные и спектральные особенности, наблюдаемые как в областях, где магнитное поле Земли соответствует дипольному приближению, так и непосредственно при пересечении зоны Южно-Атлантической аномалии.

Приведенные на рис. 5 зависимости, показывают распределения регистрируемых потоков частиц и гамма-квантов внутри аномалии. На рисунке показан временной ход скоростей счета различных параметров приборов НЕГА и "Фон-2", измеренный 8 января 1997 г. вдоль одного витка орбиты станции «Мир» (проекция этого участка орбиты на поверхность Земли изображена на рис. 3), проходящего через область Южно-атлантической аномалии. Следует обратить внимание на двухпиковый ( $\sim 18^{\text{h}}35^{\text{m}}$ ,  $\sim 18^{\text{h}}45^{\text{m}}$  UT) характер возрастания скорости счета гамма-квантов в канале 0.5-1.5 МэВ. Напомним, что прибор НЕГА регистрировал в основном тормозное гамма-излучение электронов высоких энергий, попадавших в вещество станции и самого прибора, поэтому приведенный временной ход

скоростей счета на самом деле отражает распределение интенсивности электронов с энергиями не менее 0.5 МэВ. Максимумам отмеченных на рис. 5 пиков соответствуют значения  $L \sim 1.11$  и  $L \sim 1.49$ , то есть они практически совпадают с параметрами  $L$  тех дрейфовых оболочек, на которых наблюдались устойчивые потоки электронов вне Южно-атлантической аномалии. Необходимо отметить, что указанные значения  $L$  применительно к области ЮАА следует рассматривать лишь в качестве параметров сетки геомагнитных координат, а не характеристики реальных дрейфовых оболочек, пространственная конфигурация которых в самой ЮАА существенно отличается от той, которая соответствует дипольному магнитному полю.

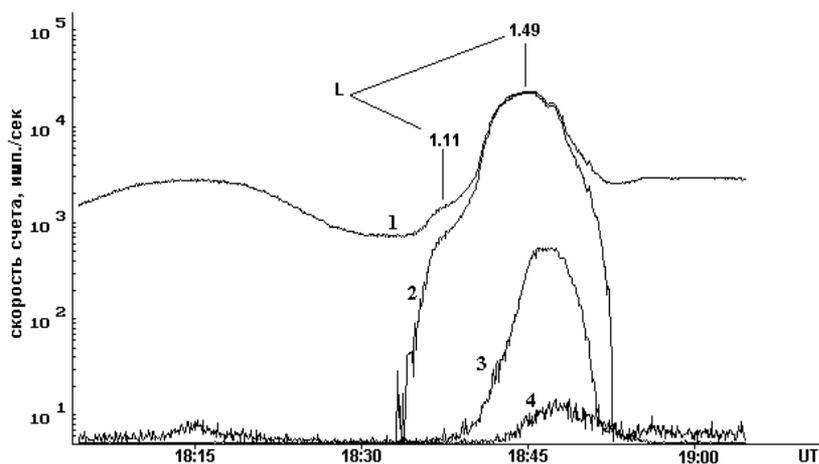


Рис. 5. Временные профили скоростей счета гамма-квантов ( $E_\gamma = 0.5 - 1.5$  МэВ, кривая 1 – полный счет, кривая 2 – вычтены скорости счета, соответствующие широтному ходу), электронов ( $E_e = 0.3 - 1.5$  МэВ, кривая 3) и протонов ( $E_p = 5 - 20$  МэВ, кривая 4), измеренные вдоль одного витка орбиты 08.01.1997 (см. рис. 3) в области пересечения Южно-Атлантической аномалии.

По-видимому, во внутреннем радиационном поясе имеются разные популяции электронов, отличающиеся также энергетическими спектрами. Если рассмотреть изменение скорости счета гамма-квантов, обусловленных тормозным излучением релятивистских электронов, во время прохождения станцией аномалии, то наряду с общим возрастанием скоростей

счета гамма-квантов во всех каналах прибора НЕГА можно выделить область, где это возрастание наиболее заметно в более жестких каналах, вплоть до  $>15$  МэВ. При этом скорости счета в канале регистрации гамма-квантов  $>15$  МэВ наиболее велики относительно показаний в других каналах именно в области с  $L = 1.1$ , расположенной на северо-западной периферии Южно-атлантической аномалии, что свидетельствует об очень жестком спектре электронов, породивших это гамма-излучение [17].

Электроны, стабильные потоки которых регистрировались при  $L \sim 1.1$  вне аномалии также характеризуются более жестким энергетическим спектром, чем электроны на оболочках с  $L \sim 1.4$  (см. рис. 2). Поскольку область регистрации повышенных потоков электронов при  $L \sim 1.1$  вблизи экватора примыкает к северо-западному краю Южно-атлантической аномалии (см. рис.3), где на  $L \sim 1.1$  как раз наблюдаются электроны высоких энергий ( $> 15$  МэВ) с жестким спектром, можно сделать вывод, что обе популяции электронов (на периферии аномалии и в районе геомагнитного экватора) тесно связаны. В то же время электроны на оболочках с  $L \sim 1.4$  вне аномалии, по-видимому, связаны с электронами, обеспечивающими генерацию более мягкого тормозного гамма-излучения в области  $L \sim 1.4$ . То, что на оболочках с меньшими  $L$  находятся электроны, характеризующиеся более жестким энергетическим спектром, находится в согласии с тем, что, как известно, при заданной величине дрейфового периода, большим значениям  $L$  должны соответствовать меньшие энергии электронов [6].

Механизм переноса электронов может быть так же связан с особенностями условий и характера движения захваченных частиц в самой Южно-атлантической аномалии. Действительно, для аномалии характерно сильное «провисание» силовых линий магнитного поля и, следовательно, соответствующих дрейфовых оболочек в плотные слои атмосферы. В свою очередь это с неизбежностью должно приводить к увеличению эффективности многократного кулоновского рассеяния электронов внутреннего радиационного пояса на атомах атмосферы. Следствием такого рассеяния может быть то, что захваченные электроны, двигаясь вдоль силовой линии магнитного поля и, попадая в более плотные слои атмосферы, испытав рассеяние с какой-то вероятностью

могут диффундировать поперек магнитного поля и отражаться обратно в области околоземного пространства с малой плотностью остаточной атмосферы. В этом смысле можно считать, что электроны заполняющие внутреннюю область квазизахвата, суть электроны альбеда при высыпании частиц вдоль восточной периферии Южно Атлантической аномалии. Поскольку внутри аномалии регистрируются повышенные протоки электронов в областях, географическое положение которых соответствует дрейфовым оболочкам с  $L = 1.1$  и  $L = 1.4$ , именно на эти оболочки имеет место более вероятное попадание электронов альбеда. Оказавшись вне ЮАА, рассеянные электроны будут дрейфовать с запада на восток и, таким образом будет происходить заполнение дрейфовых оболочек во всей области дипольного магнитного поля вплоть до западной границы Южно-Атлантической аномалии.

### Список литературы.

1. *Van Allen J.A.* "The First Public Lecture on the Discovery of the Geomagnetically Trapped radiation". // State University of Iowa Rept. 60-13. 1960.
2. *Вернов С.Н., Чудаков А.Е., Вакулов П.В., Логачев Ю.И.* "Изучение земного корпускулярного излучения и космических лучей при пролете космической ракеты". // ДАН СССР. 1959. Т.125. №2. С.304-307.
3. *Вернов С.Н. Чудаков А.Е.* "Исследование космических лучей и земного корпускулярного излучения при пролетах ракет и спутников". // УФН. 1960. Т.70. Вып.4. С.585-619.
4. *Хесс В.* «Радиационный пояс и магнитосфера». М.: Атомиздат. 1972. 352 с.
5. *Тверской Б.А.* «Динамика радиационных поясов Земли». М.: Наука. 1968. 224 с.
6. *Редерер Х.* «Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем». М.: Мир. 1972. 192 с.
7. «Физика магнитосферы» (под ред. Д. Вильямса и Дж. Мида). М.: Мир. 1972. 592 с.
8. *Лайонс Л., Уильямс Д.* «Физика магнитосферы». М.: Мир. 1987. 312 с.
9. *Van Allen J.A.* "Spatial distribution and time decay of the intensities of geomagnetically trapped electrons from the high altitude nuclear burst of July 1962", in "Radiation Trapped in the Earth's magnetic Field", ed. B.M. McCormac, D. Reidel. Publ. Co, Dordrecht, Holland, 1966, p.575-592.
10. *Schultz M., Lanzerotti L.J.* "Particle Diffusion in the Radiation Belts". 1974. Springer, Berlin, p.143.
11. *McIlwain C.E.* "Measurement of trapped electron intensities made by the Explorer XY satellite", in "Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field", ed. B.M. McCormac, D. Reidel. Publ. Co, Dordrecht, Holland, 1966, p.575-592.

12. *Vampola A.L., Kuck G.A.* "Induced precipitation of inner zone electrons 1. Observations". // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V.83. P.2543.
13. *Imhoff W.L., Reagan J.B., Gains E.E.* "The energy selective precipitation of inner zone electrons". // *J. Geophys. Res.* 1978. V.84. P.4245.
14. *Imhoff W.L., Reagan J.B., Gains E.E., Anderson R.* "Narrow spectral peaks in electron precipitating from the slot regions". // *J. Geophys. Res.* 1983. V.88. P.8103.
15. *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. V.36. P.591-606.
16. *Кудрявцев М.И., Панков В.М., Богомолов А.В. и др.* "Эксперимент "ГРИФ-1" на модуле "СПЕКТР" ОКС "МИР": «Исследование рентгеновского, гамма- и нейтронного излучений солнечных вспышек, а также связи солнечной активности с динамикой потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли». // *Известия ВУЗов, сер. Радиофизика*, Т.39. 1996. № 11-12. С.1539-1545.
17. *Богомолов А.В. Богомолов В.В., Денисов Ю.И. и др.* "Характеристики компонентов фонового гамма-излучения и нейтронов на орбитах станции "Мир"". // *Космич. исслед.* 2000. Т.38. С.377-387.
18. *Hashimoto T.* (Web Des., World Data Center for Geomagnetism, Kyoto). // <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
19. *Fairfield D.H., Tsyganenko N.A., Usmanov A.V., Malkov M.V.* "A large magnetosphere magnetic field database". // *J. Geophys. Res.* 1994. V.99. P.11319-11326.
20. *Вернов С.Н., Чудаков А.Е., Вакулов П.В. и др.* "Исследование радиации на искусственном спутнике Земли "Космос-17"". // *Изв.РАН. Сер.физ.* 1964. Т.28. С.2058-2074.

**Богомолов Андрей Владимирович, Денисов Юрий Иванович,  
Колесов Герман Яковлевич, Кудрявцев Михаил Иванович,  
Логачев Юрий Иванович, Морозов Олег Вячеславович,  
Свертилов Сергей Игоревич**

**ПОТОКИ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ  $>0.08$  МЭВ НА  
ДРЕЙФОВЫХ ОБОЛОЧКАХ  $L < 2$  НА ОРБИТАХ СТАНЦИИ «МИР»**

Препринт НИИЯФ МГУ 2005-9/775  
Работа поступила в ОНТИ

Издательство УНЦ ДО  
ИД № 00545 от 06.12.1999

117246, Москва, ул. Обручева, 55-А, УНЦ ДО  
т/ф (095) 718-65966, -7767, -7785 (комм.)  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://abiturcenter.ru/izdat>

Заказное. Подписано в печать 01.03.2005г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная №2. Усл.п.л. 1.25  
Тираж 50 экз. Заказ № 771

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО  
<http://abiturcenter.ru/print>  
в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета