

УДК 537.591.5

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ СУБРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ВЕРНОВ

© 2020 г. В. Л. Петров¹, А. В. Богомолов^{1, **}, В. В. Богомолов^{1, 2}, В. В. Калегаяев¹, М. И. Панасюк^{1, 2}, С. И. Свертилов^{1, 2, *}, А. А. Косенко¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелевича

Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

²Московский государственный университет

им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва, Россия

*e-mail: sis@coronas.ru

**e-mail: aabboogg@sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 07.04.2019 г.

После доработки 10.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Изучение пространственного распределения и динамики потоков электронов субрелятивистских энергий (от нескольких десятков до сотен кэВ) проводилось в ходе космического эксперимента на спутнике Вернов. Был проведен совместный анализ данных экспериментов на спутниках Вернов и ROES. Получены карты глобального распределения в околоземном пространстве потоков электронов с энергиями от сотен кэВ до МэВ, а также их распределения по дрейфовым оболочкам, локальному времени и геомагнитной долготе. Показано, что значимые потоки электронов субрелятивистских энергий существуют на дрейфовых оболочках, характеризуемых значениями параметра параметра МакИлвайна $L < 1.5$. Измеренное долготное распределение потоков электронов на указанных дрейфовых оболочках свидетельствует о том, что наблюдающиеся потоки “привязаны” к этим оболочкам, а неоднородности долготного распределения обусловлены особенностями конфигурации магнитного поля на орбитах спутников.

DOI: 10.31857/S001679402002011X

1. ВВЕДЕНИЕ

В то время, как радиационные пояса Земли были открыты и достаточно хорошо изучены еще в начале космической эры (кроме буревой динамики релятивистских электронов во внешнем поясе) [Abel and Vampola, 1997], информация о потоках и спектрах электронов под радиационными поясами остается недостаточно полной [Krasovskii, 1961; Galperin et al., 1970; Hill et al., 1970; Heikkila, 1971; Hayakawa et al., 1973; Kohno, 1973; Gusev et al., 1995; Братолобова-Цулукидзе и др., 2001; Grigoryan et al., 2008; Lazutin, 2012]. Традиционно считается, что потоки энергичных электронов на $L < 1.5$ малы, на много порядков величины меньше, чем во внутреннем радиационном поясе.

Тем не менее, на низких (менее 1000 км) орбитах небольшие (по сравнению с радиационными поясами), но вполне значимые потоки электронов субрелятивистских энергий наблюдаются на низких широтах вне Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), в том числе на $L < 1.2$, то-есть фактически вблизи экватора. До сих пор нет доста-

точно полной картины и о динамике потоков таких частиц на малых высотах (“под радиационными поясами”) в областях, соответствующих значениям $L < 1.5$. Это обусловлено малыми величинами потоков, что требует использования детекторов с достаточно большим геометрическим фактором. До сих пор большинство проведенных экспериментов было ориентировано на изучение очень больших потоков захваченных частиц именно в радиационных поясах, для чего использовались детекторы как раз с малым геометрическим фактором.

Существенная информация о потоках электронов в областях, соответствующих $L < 2$ вне ЮАА, была получена на орбитальной станции (ОС) “Мир” (эксперименты серии СПРУТ [Братолобова-Цулукидзе и др., 2001; Grigoryan et al., 2008], эксперимент ГРИФ [Кудрявцев и др., 1996]). В частности, в эксперименте ГРИФ для регистрации электронов использовался прибор ФОН-1, который благодаря большому геометрическому фактору ($\sim 80 \text{ см}^2 \text{ с ср}$) имел высокую чув-

ствительность, позволявшую регистрировать вариации потоков электронов малой интенсивности. В ходе экспериментов на ОС “Мир” значимые потоки электронов ($\sim 0.2\text{--}0.5$ част./см² с ср в диапазоне энергий 80–160 кэВ и ~ 1 част./см² с ср в диапазоне энергий >200 кэВ регистрировались в том числе на $L < 1.2$. Причем в области $L \sim 1.07\text{--}1.10$ во временном ходе скоростей счета прослеживалась структура, симметричная относительно геомагнитного экватора [Богомолов и др., 2005]. Наличие подобных структур, очевидно, связано с пересечением орбитой станции дрейфовых оболочек, отличающихся повышенной концентрацией электронов.

Распределения потоков электронов на дрейфовых оболочках, характеризовавшиеся малыми значениями L , также измерялись на космических аппаратах NOAA POES [Rodger et al., 2010]. Спутники серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) запускаются с начала 70-х годов прошлого века на солнечно-синхронные орбиты с высотой около 800 км. Прибор, регистрировавший электроны в экспериментах POES, состоял из двух идентичных детекторов, расположенных перпендикулярно друг другу. Первый, названный “0-град.”, ориентирован практически в зенит, второй, названный “90-град.”, – антипараллельно скорости аппарата. Таким образом, в поле зрения первого детектора на малых широтах попадали частицы с большими питч-углами в то время, как второй смотрел вдоль силовых линий магнитного поля Земли. На высоких широтах ситуация обратная – первый детектор был направлен вдоль магнитных силовых линий, а второй – под большим углом. Оба детектора электронов работали в следующих энергетических диапазонах: $E > 30$ кэВ; $E > 100$ кэВ; $E > 300$ кэВ.

Изучение вариаций потоков и спектров электронов в околоземном космическом пространстве, в том числе и в экваториальных областях под радиационными поясами, было одной из задач эксперимента с научной аппаратурой РЭЛЕК на спутнике Вернов (МКА-ФКИ ПН2). В настоящей работе приведены пространственные и временные характеристики распределения потоков субрелятивистских электронов на $L < 1.5$ по данным спутника Вернов. Также рассмотрены результаты сравнения с распределениями потоков электронов в приэкваториальных областях, полученными на спутнике NOAA POES-15.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Цели и задачи эксперимента на ИСЗ Вернов (запущен 8 июля 2014 г. на солнечно-синхронную орбиту с апогеем 830 км, перигеем 640 км, наклоном 98.4°, периодом обращения ~ 100 мин), а также научная аппаратура “РЭЛЕК”, установлен-

ная на данном спутнике, подробно описаны в [Панасюк и др., 2016а, б].

В настоящей работе мы используем данные, полученные в основном при помощи детекторных блоков ДРГЭ-1(2) прибора ДРГЭ (Детектор Рентгеновского, Гамма-излучения, Электронов), входившего в состав аппаратуры РЭЛЕК.

Прибор ДРГЭ предназначен для изучения жесткого электромагнитного излучения высотных атмосферных разрядов и высыпающихся магнитосферных электронов высоких энергий в космическом пространстве. Прибор обеспечивал регистрацию потоков и спектров жесткого рентгеновского и гамма-излучения, а также заряженных частиц космического излучения в околоземном пространстве. С помощью прибора регистрировались гамма-кванты с энергиями 0.01–3.0 МэВ, электроны с энергиями 0.2–15 МэВ, протоны с энергиями 4–100 МэВ.

Прибор состоял из трех блоков: двух идентичных блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 и блока ДРГЭ-3. Оси детекторных узлов блоков ДРГЭ-1 и ДРГЭ-2 были направлены в местный надир. Оси детекторов блока ДРГЭ-3 были направлены следующим образом: ось детектора № 1 – в местный зенит, ось детектора № 2 – против вектора скорости космического аппарата, ось детектора № 3 под углом 90° к плоскости, образованной векторами скорости и направлением в местный зенит (перпендикулярно плоскости орбиты). Точность ориентации осей детекторов составляла $\pm 3^\circ$.

Каждый блок ДРГЭ-1(2) включал два идентичных детекторных узла, состоявших из сцинтилляционного фосвич-детектора NaI(Tl)/CsI(Tl) диаметром 13 см и суммарной толщиной 2 см, при этом кристаллов NaI(Tl) имел толщину 0.3 см, а кристалл CsI(Tl) толщину 1.7 см. Таким образом суммарная площадь всех 4-х детекторов составляла $4 \times 120 = 480$ см². Оба детектора находились в оптическом контакте и просматривались одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) с диаметром фотокатода 11 см. Для идентификации сигналов от каждого сцинтиллятора использовалась специальная электронная схема, позволявшая разделять выходные сигналы ФЭУ по фронтам, длительность которых определяется временем высвечивания сцинтиллятора (несколько мкс для CsI(Tl) и ~ 0.2 мкс для NaI(Tl)).

Что касается детекторных узлов блока ДРГЭ3, то они представляли собой фосвич CsI(Tl)/BGO диаметром ~ 1.8 см и суммарной толщиной 2 см (толщина CsI(Tl) – 0.3 см, толщина BGO – 1.7 см). В каждом детекторном узле оба кристалла, находившиеся в оптическом контакте, были помещены в “антисовпадательный” колпак из пластмассового сцинтиллятора, при этом все три сцинтиллятора просматривались одним ФЭУ.

Использование фосвич-детекторов позволяло идентифицировать события, связанные с регистрацией гамма-квантов и электронов (регистрация электронов также осуществлялась по создаваемому ими в веществе спутника и детектора тормозному излучению).

В ходе эксперимента осуществлялась непрерывная запись показаний детекторов блоков ДРГЭ-1(2) в двух режимах: “мониторинговом” и “пособытийном”. Для обеспечения синхронной работы всех детекторных узлов с хорошим временным разрешением каждый узел использовал инициализацию внутреннего таймера в момент прихода синхроимпульса с борта спутника. Таймер каждого узла имеет период 15,48 мкс. Стабильность таймера $\sim 10^{-5}$ позволяла обеспечить точность синхронизации ~ 15 мкс.

В “мониторинговом” режиме для каждого детекторного узла блоков ДРГЭ-1(2) за заданное время экспозиции (1 с) измерялся средний интегральный счет гамма-квантов (и электронов) отдельно для каждого кристалла NaI(Tl), CsI(Tl) и суммарный счет в обоих кристаллах. Минимальная пороговая энергия регистрируемого кванта (частицы) составляла ~ 10 кэВ для NaI(Tl) и ~ 25 кэВ для CsI(Tl). Таким образом, в “мониторном” режиме были получены практически непрерывные временные ряды усредненных за 1 с скоростей счета гамма-квантов (и электронов) с энергиями > 10 кэВ в NaI(Tl) и > 25 кэВ в CsI(Tl). В случае детекторов блока ДРГЭ3 за заданное время экспозиции аналогично измерялся средний интегральный счет регистрируемых частиц и квантов в кристаллах CsI(Tl) и VGO, а также в пластмассовом сцинтилляторе.

В “пособытийном” режиме для каждого детекторного узла блоков ДРГЭ-1(2) и ДРГЭ3 в случае регистрации гамма-кванта или заряженной частицы фиксировались время регистрации и значения кодов амплитуды, позволявшие определить, в какой части детектора произошло взаимодействие и какая энергия выделилась в кристаллах. Таким образом, из пособытийных данных для каждого кристалла можно восстановить количество отчетов за заданный интервал времени в заданном диапазоне энерговыделений.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Для анализа распределения потоков электронов использовались данные прибора ДРГЭ, полученных в “мониторинговом” режиме. Порог прямой регистрации электронов, который определялся толщиной кожуа перед входным окном детектора (~ 500 мкм для детекторов блоков ДРГЭ-1(2) и ~ 300 мкм для детекторов блока ДРГЭ-3), составлял ~ 0.45 и ~ 0.2 МэВ соответственно. Однако за счет регистрации тормозного

излучения, генерируемого электронами в веществе спутника и прибора, временной ход интегрального счета в кристаллах NaI(Tl) блоков ДРГЭ-1(2) и кристаллах CsI(Tl) блока ДРГЭ-3 отражал преимущественно временной ход интенсивности электронов с энергией больше 40–50 кэВ, а временной ход интегрального счета в кристаллах CsI(Tl) блоков ДРГЭ-1(2) и в кристаллах VGO блока ДРГЭ-3 – соответственно временной ход интенсивности электронов с энергией более ~ 100 кэВ.

Поскольку основной задачей настоящей работы является исследование глобального распределения потоков электронов на дрейфовых оболочках, в том числе в области малых L в приэкваториальных областях, следовало исключить кратковременные вариации интенсивности, в частности обусловленные высыпаниями из радиационных поясов различной природы. Для этого исходные значения средних за 1 с скоростей счета были усреднены методами “скользящего среднего” по ± 30 точкам. В качестве примера на рис. 1 (вставка в верхней части рисунка) представлены усредненные указанным способом временные профили интегральных скоростей счета: две верхние кривые – в NaI(Tl) (серая), CsI(Tl) (черная) блока ДРГЭ-1 (детекторный узел № 1), три нижние кривые – суммарные скорости счета трех детекторов блока ДРГЭ-3: № 1 (черная кривая), № 2 (серая кривая), № 3 (светло-серая кривая). Эти кривые построены для половины витка орбиты 17 октября 2014 г., 03^h50^m00^s–04^h30^m00^s UT. В нижней части рисунка изображена проекция этого фрагмента витка орбиты на карту поверхности Земли в виде сплошной гладкой линии, также отмечены начало и конец указанного интервала на фрагменте орбиты. Этот временной интервал выбран таким образом, чтобы соответствующий фрагмент орбиты был симметричен относительно экватора, причем, как видно из рис. 1, спутник двигался из Северного полушария в Южное.

Следует отметить на профилях, приведенных на рис. 1, скорости счета возрастания интенсивности, обусловленные пересечением зон захваченной радиации (внешнего радиационного пояса), а также областей квазизахваченных и высыпающихся частиц. Особо необходимо выделить возрастание интенсивности в приэкваториальной области, соответствующее значениям $L < 1.1$. Следует обратить внимание на то, что амплитуда этого возрастания скорости счета в детекторах ДРГЭ-31 и ДРГЭ-33 больше, чем в детекторе ДРГЭ-32. Это означает, что в приэкваториальной области регистрируются квазизахваченные частицы, поскольку для них, также, как и для захваченных частиц, характерно анизотропное пичугловое распределение, максимум которого соответствует направлению, перпендикулярному силовой линии магнитного поля. Поскольку в

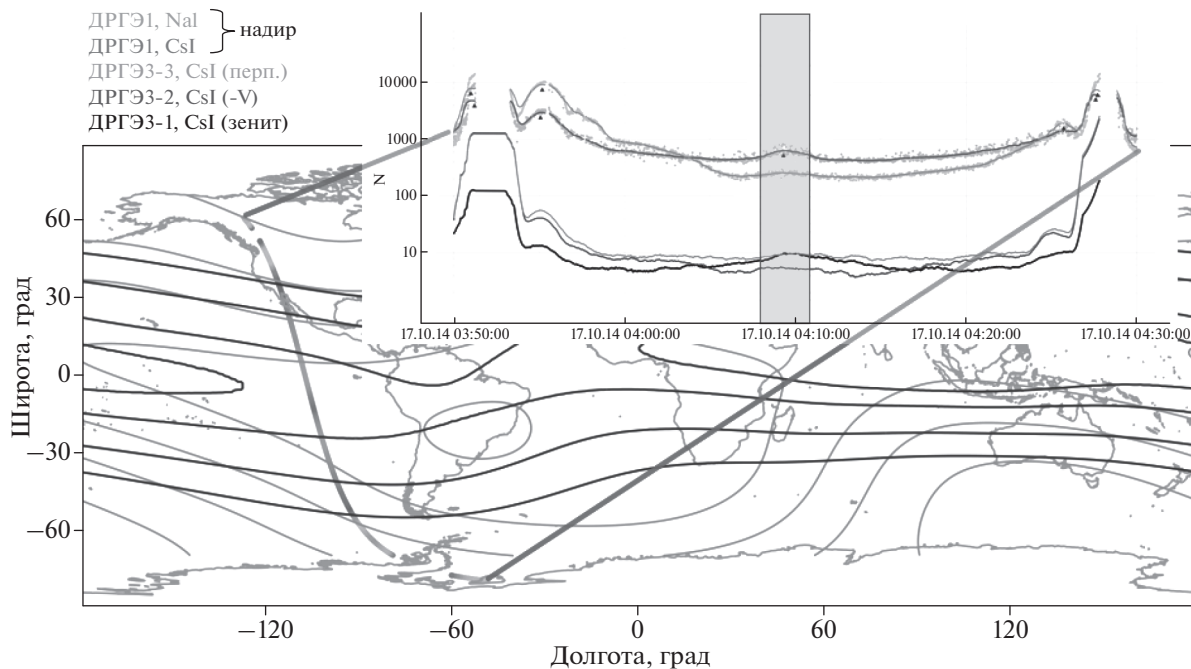


Рис. 1. Верхняя панель: усредненные интегральные скорости счета в детекторных узлах прибора ДРГЭ. Нижняя панель: карта поверхности Земли с нанесенной проекцией части витка орбиты.

районе экватора силовые линии практически параллельны поверхности Земли, большой счет должен наблюдаться именно в детекторе ДРГЭ-31, ось которого ориентирована вдоль линии “надир-зенит”, то есть как раз перпендикулярно силовой линии магнитного поля, а также в детекторе ДРГЭ-33, ось которого ориентирована перпендикулярно плоскости орбиты, практически совпадающей с плоскостью магнитного меридиана. Меньший счет при этом должен наблюдаться в детекторе ДРГЭ-32, ось которого направлена против вектора скорости спутника, т.е. в приэкваториальной плоскости лежит вдоль силовой линии магнитного поля.

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ

Зависимости, подобные изображенным на рис. 1, были построены для всего интервала функционирования спутника Вернов, т.е. с июля по декабрь 2014 г. На рисунке 2 изображена карта, построенная по временным зависимостям суммарного счета в детекторах NaI(Tl) и CsI(Tl) блока ДРГЭ-11, полученного путем суммирования отчетов, регистрируемых обоими детекторами блока за все время полета спутника. Эти отчеты в основном обусловлены регистрацией тормозного излучения электронов с энергиями более 50 кэВ. С учетом падающего энергетического спектра электронов, карта на рис. 2 представляет глобальное распределение потоков электронов с энергиями от ~50 до нескольких сотен кэВ. Степень “черноты”

цвета отражает величину скорости счета, соответствующей интенсивности регистрируемых потоков (чем чернее, тем выше потоки). Белый цвет соответствует уровням, при которых детекторы прибора были перегружены или же прибор выключался (в области ЮАА). На карте также изображены изолинии напряженности магнитного поля B (светло-серые линии, B от 0.247 до 0.395 Гс) и параметра L (темно-серые линии, $L = 1.1; 1.2; 1.5; 2$), построенные по модели IGRF для средней высоты 700 км. Некоторая “полосатость” карты обусловлена особенностями орбиты спутника Вернов: проекция каждого витка солнечно-синхронной орбиты приходится примерно на одни и те же участки поверхности Земли, а каждые двое суток орбита проходит над одинаковыми географическими областями.

Карта, изображенная на рис. 2, отражает характерные области околоземного пространства, в которых наблюдался повышенный счет электронов: помимо ЮАА и внешнего радиационного пояса, это область регистрации квазизахваченных электронов на $L \sim 2.2$, область высыпаний из внутреннего пояса ($L \sim 1.7-1.8$), которая наиболее контрастно видна в южном полушарии (примыкает к южной “кромке” ЮАА). Также следует отметить наличие повышенного счета в приэкваториальных областях ($L < 1.5$), особенно в районе западной периферии ЮАА и в области $90^\circ-120^\circ$ восточной долготы.

Для выявления областей повышенного счета электронов вне областей захваченной радиации на временных зависимостях скорости счета, по-

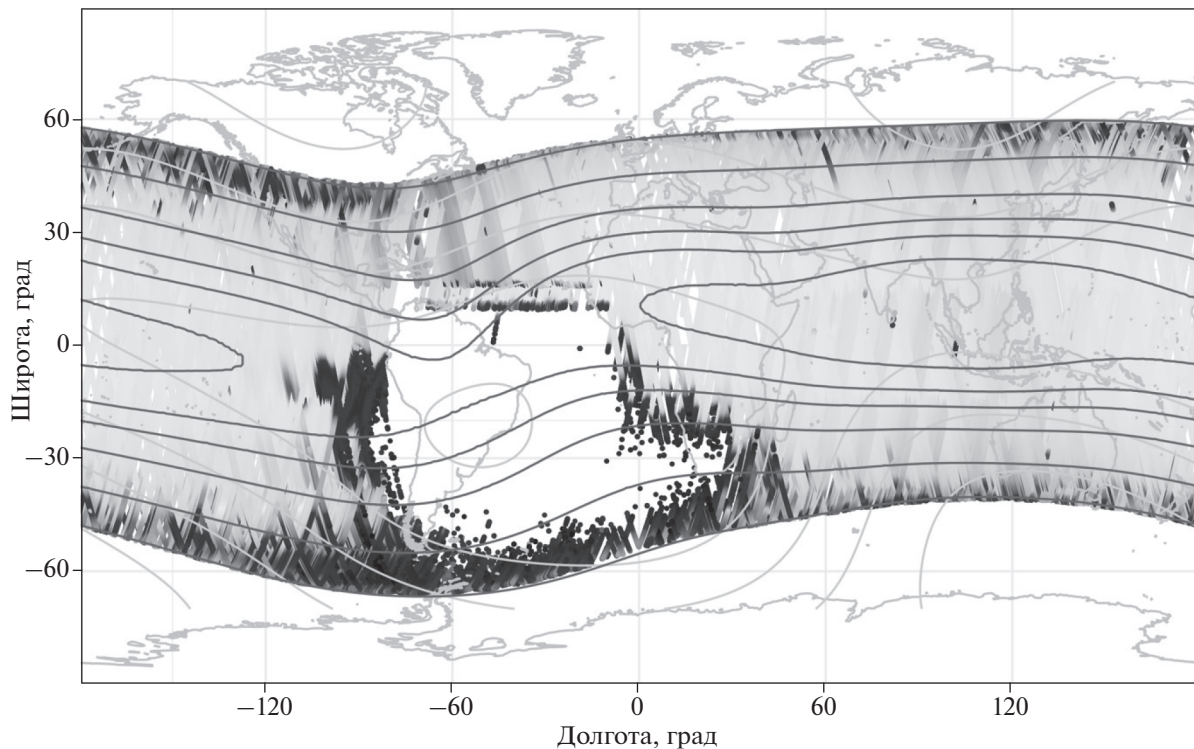


Рис. 2. Карта глобального распределения субрелятивистских электронов на орбитах спутника Вернов (~600–800 км).

добных изображенным на рис. 1, выделялись локальные максимумы, соответствующие указанным областям. В качестве критерия выделения локального максимума использовалось условие:

$$N_{i-n} \leq \dots \leq N_{i-1} < N_i > N_{i+1} \geq \dots \geq N_{i+n},$$

где N_i – текущее значение средней скорости счета, полученное методом скользящего среднего, n подбиралось для отсева ложных срабатываний и градации событий по длительности и для рассматриваемых событий составляло 15.

Географические координаты точек, соответствующие регистрации выделенных локальных максимумов, были отмечены на карте. Пример такой карты, построенной для локальных максимумов, выделенных на временных зависимостях усредненных скоростей счета в кристалле CsI(Tl) детекторного узла ДРГЭ-11, для области низких широт, представлен на рис. 3. Максимумы интенсивности электронов отмечены точками разного оттенка серо-черного цвета, отражающего амплитуду максимума (большим амплитудам соответствуют более темные точки). На карте также изображены изолинии напряженности магнитного поля B (светло-серые линии, B от 0.247 до 0.395 Гс) и параметра L (темно-серые линии, $L = 1.1; 1.2; 1.5; 2$), построенные по модели IGRF для средней высоты 700 км. Кроме того, были построены распределения числа локальных максимумов интенсивности счета электронов по гео-

графической долготе и параметру МакИлвайна L отдельно для Северного и Южного полушарий. Распределения строились таким образом, что количество зарегистрированных максимумов, относящихся к данному интервалу значений L , нормировалось на полное время работы прибора на данном интервале. Примеры таких распределений также приведены на рис. 3, причем долготное распределение привязано к географическим координатам, указанным на рисунке. Что касается распределения по параметру L , то оно, по сути, отражает распределение по широте, поэтому такие распределения отдельно для Северного и Южного полушарий показаны сбоку карты.

Остановимся на глобальном распределении потоков электронов субрелятивистских энергии на примере материалов, представленных на рис. 2, 3. Распределение максимумов по долготе отражает долготную неоднородность магнитного поля вследствие различных “аномалий”. В частности, “провисание” за счет подобной неоднородности дрейфовых оболочек относительно средней высоты орбиты спутника приводит к тому, что соседние по долготам точки могут соответствовать разным дрейфовым оболочкам. Неоднородность долготного распределения в Южном полушарии связана в основном с ЮАА. В области ЮАА научная аппаратура, как правило, выключалась, что отражает “провал” на долготном распределении.

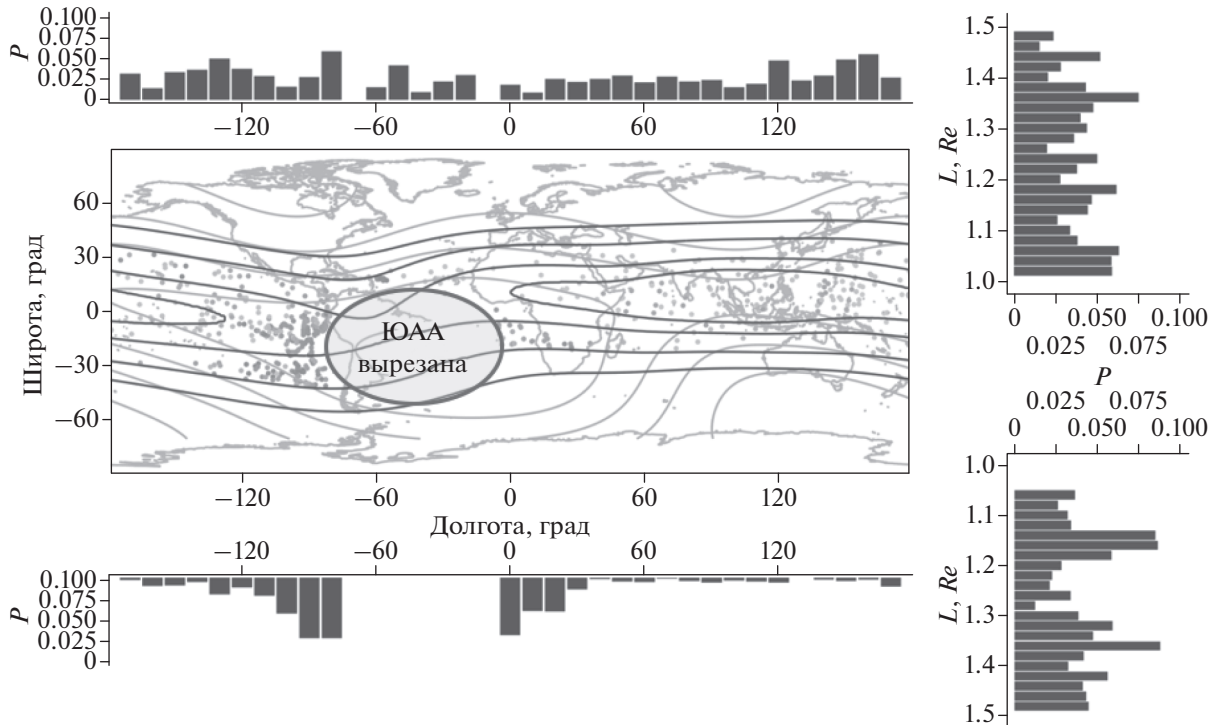


Рис. 3. Карта распределения локальных максимумов интенсивности счета электронов (кристалл NaI(Tl) детекторного узла № 1 блока ДРГЭ-1) в диапазоне $1 < L < 1.5$. Сверху и снизу карты показаны распределения локальных максимумов интенсивности по географической долготе, а с правого бока карты – по параметру L , соответственно, для Северного и Южного полушарий.

Распределение максимумов интенсивности электронов по параметру L , то есть по дрейфовым оболочкам, как видно на рис. 3, указывает на то, что существуют дрейфовые оболочки, отличающиеся повышенной концентрацией электронов. Для низкоширотных областей на распределении по L можно выделить несколько пиков, симметричных относительно экватора: $L \sim 1.4-1.5$, $L \sim 1.2$, $L \sim 1.05$, которые свидетельствуют о наличии повышенных потоков электронов субрелятивистских энергий на соответствующих дрейфовых оболочках. Особо следует отметить наличие таких повышенных потоков на $L \sim 1.05$, то есть практически в районе геомагнитного экватора.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из карты, представленной на рис. 2, вблизи геомагнитного экватора наблюдается увеличение концентрации электронов в районе восточной периферии ЮАА. Это может быть объяснено естественным образом, поскольку имеет место дрейф электронов вдоль оболочек с запада на восток, который на малых L приводит к “стоку” дрейфующих электронов в ЮАА. Таким образом, на восточной периферии ЮАА имеет место суперпозиция потоков электронов, относящихся собственно к ЮАА и “стекающих” вдоль дрейфовых оболочек, характеризующихся малыми значениями L .

Интересно сравнить полученные распределения потоков электронов на малых L с данными космического эксперимента NOAA POES-15 (данные POES доступны на сайте <http://poes.ngdc.noaa.gov/data/>).

Были рассмотрены данные NOAA POES-15 за период с 01.01.2000 г. по 04.04.2000 г. В этом временном диапазоне отбирались возрастания потоков электронов над фоновым значением в каналах прибора “0-град.” для областей, соответствующих $L < 2$. Всплеск с интенсивностью, превышающей фоновый счет в 3 раза ($\sigma \geq 3$), засчитывался, если он происходил одновременно как минимум в двух нижних энергетических интервалах. Зона ЮАА отсекалась по географическим координатам: данные с координатами, попадающими в область ЮАА на высоте 800 км, исключались из обработки. Полученное по результатам обработки распределение возрастных потоков электронов по L -оболочкам показано на рис. 4. В этом распределении количество возрастных, зарегистрированных на данном интервале значений L , нормировалось на полное число возрастных.

На рисунке 4 для сравнения также приведены распределения по L локальных максимумов интенсивности потоков электронов, полученные по данным измерений на спутнике Вернов. Как видно из рисунков, на обоих распределениях выделя-

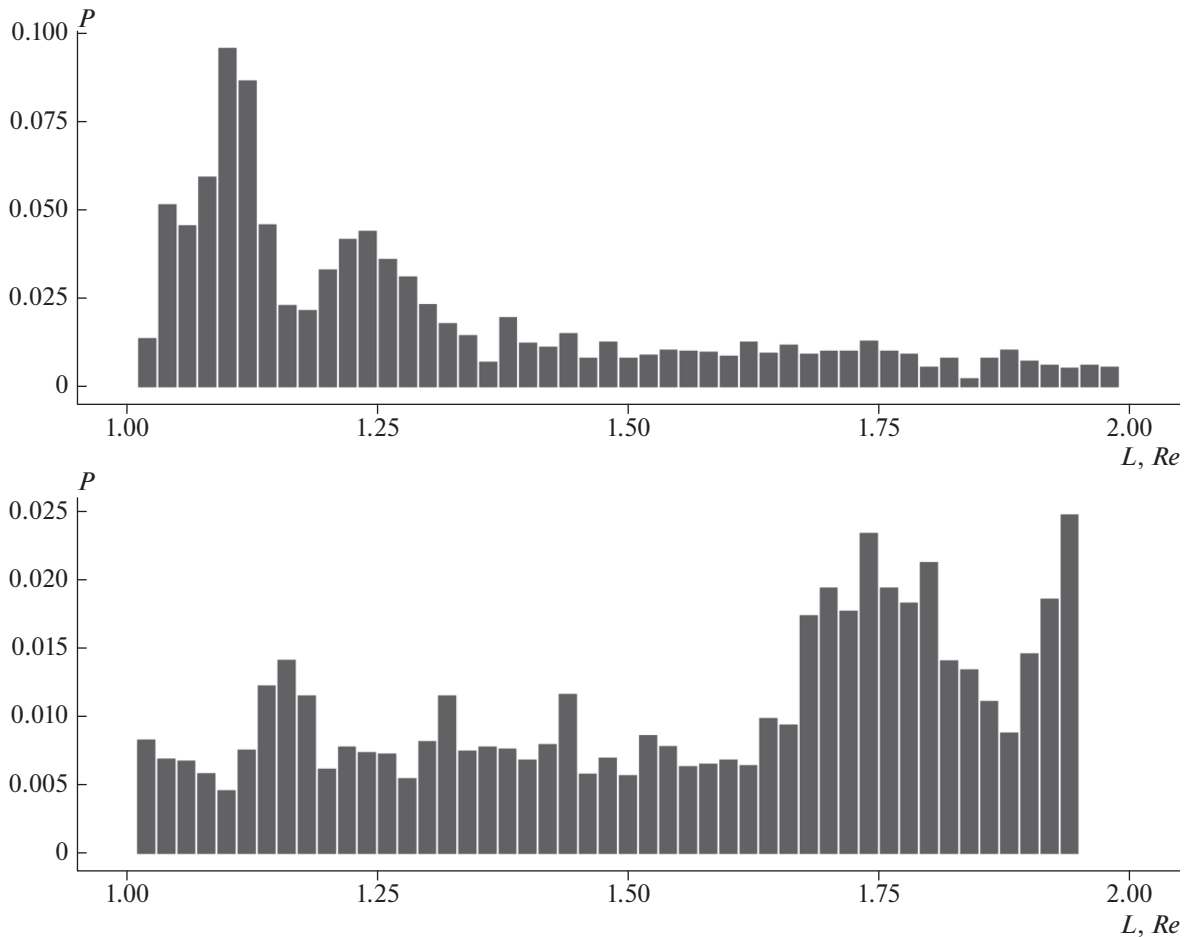


Рис. 4. Распределение по параметру L максимумов возрастных потоков энергичных электронов по данным NOAA POES-15 (верхняя панель) и РЭЛЕК Вернов (прибор ДРГЭ-1), (нижняя панель).

ются максимумы, показывающие дрейфовые оболочки, на которых наблюдаются повышенные потоки электронов. Для распределения, построенного по данным спутника POES-15, это $L \sim 1.10-1.15$; $\sim 1.2-1.3$. Для распределения, полученного по данным эксперимента РЭЛЕК, это $L \sim 1.13-1.19$; $\sim 1.30-1.35$. На этом распределении также выделяется интервал $L \sim 1.7-1.8$, который соответствует области высыпаний из внутреннего радиационного пояса [Nagata et al., 1988]. То, что эта область не выделяется на распределении, построенном по данным POES-15, объясняется тем, что использовались параметры прибора “0-град”. На низких и средних широтах этот прибор регистрировал преимущественно захваченные и квазизахваченные частицы и с меньшей вероятностью — высыпавшиеся. Детекторы прибора ДРГЭ-1 были всенаправленными и могли регистрировать частицы, как захваченные, так и падающие в конус потерь. С другой стороны, несмотря на точно эксперименты на спутниках Вернов и POES-15 отстояли по времени на 14 лет, и в них использовались разные методики регистрации электронов, максимумы в распределениях

при $L \sim 1.15, 1.3$ существенно перекрываются в обоих распределениях. Это говорит о существовании на указанных оболочках довольно стабильных потоков электронов, что в свою очередь подтверждает и результаты наблюдений на ОС “Мир” [Богомолов и др., 2005].

Также следует обратить внимание на существовании значимых потоков электронов вблизи геомагнитного экватора на $L < 1.1$, что, как видно на рис. 4, следует из данных обоих экспериментов на спутниках Вернов и POES-15. Об этом также свидетельствует более детальный анализ зависимости числа возрастных потоков в зависимости от параметра L (фактически, от широты — для данной области), который показал наличие тонкой структуры в распределении возрастных по L в приэкваториальной области (рис. 5): повышенные потоки электронов концентрируются, в частности, в районе $L \sim 1.04$. Об этом же свидетельствуют и данные эксперимента на спутнике Вернов (рис. 4).

Для интервалов $L < 1.08$; $1.12 \leq L < 1.18$ и $1.22 \leq L < 1.30$ по данным POES и Вернов было построено распределение локальных максимумов

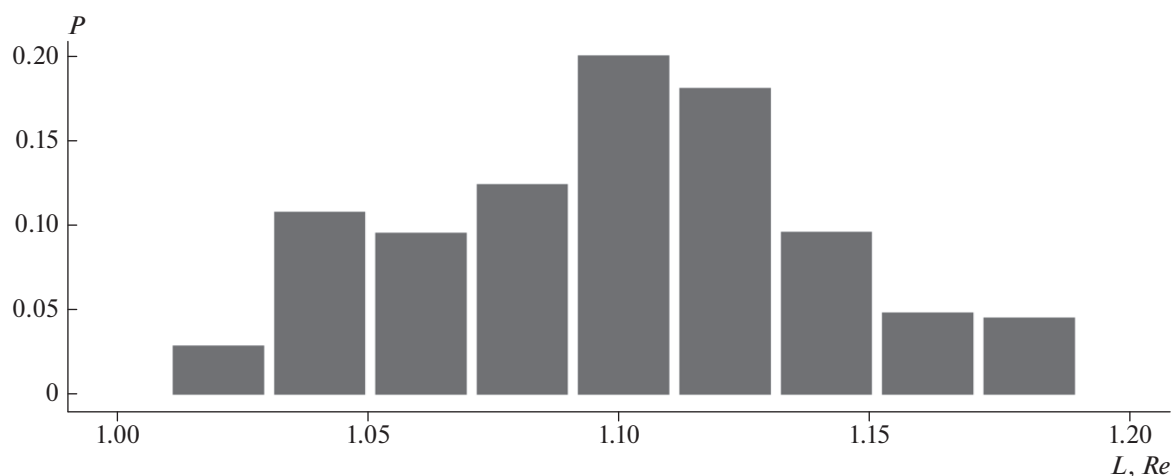


Рис. 5. Распределение зарегистрированных возрастных потоков электронов по L -оболочкам в приэкваториальной области по данным NOAA POES-15.

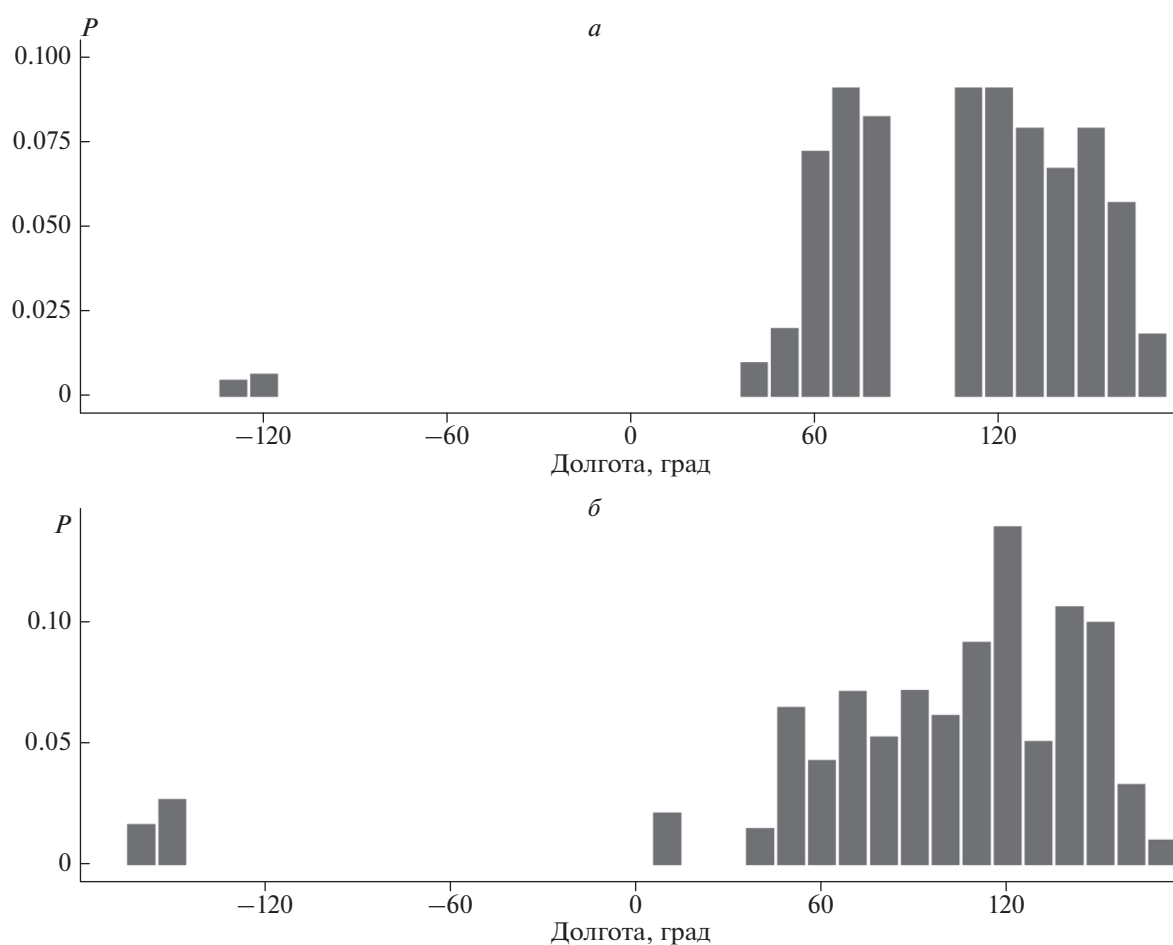


Рис. 6. Долготное распределение максимумов потоков электронов на $L < 1.08$ по данным NOAA POES-15 (а), РЭЛЕК Вернов (прибор ДРГЭ-1) (б).

потоков электронов по долготе с шагом в 10° (рис. 6–8). Распределение по долготе строилось аналогично распределению по L -оболочкам (число точек в интервале, нормированное на общее число точек для POES и число точек, норми-

рованное на время нахождения прибора на данной L -оболочке для Вернов). Из рисунков видно, что данные обоих экспериментов не противоречат друг другу. Была обнаружена определенная закономерность в распределении потоков, а

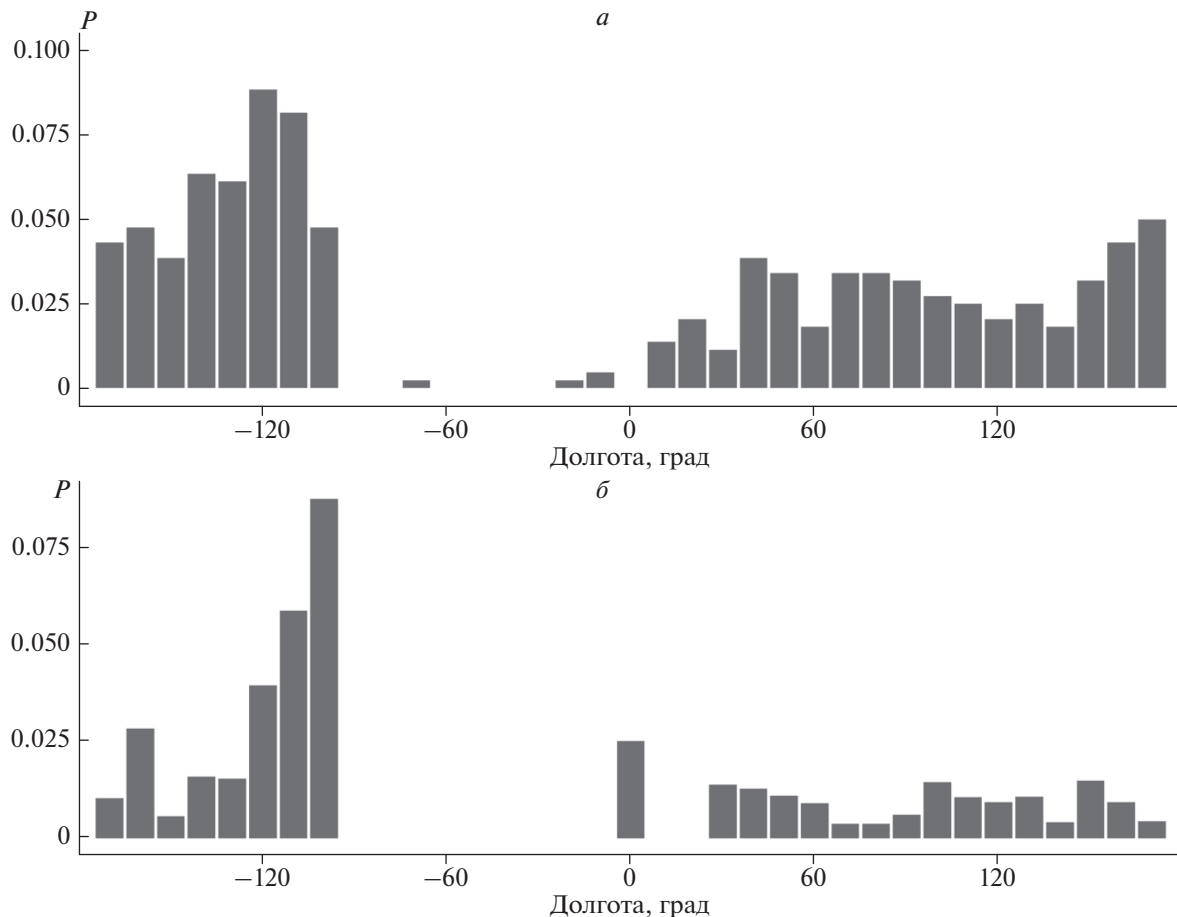


Рис. 7. Долготное распределение максимумов потоков электронов на $1.12 < L < 1.18$ по данным NOAA POES-15 (а), РЭЛЕК Вернов (прибор ДРГЭ-1) (б).

именно: большая часть потоков на оболочках не более $L < 1.08$ сконцентрирована на долготах $\sim 50^\circ - 170^\circ$, что вполне можно объяснить особенностью орбиты спутников: L -оболочки < 1.08 спутники, летящие на высотах 600–800 км, пересекают лишь в области, противоположной ЮАА.

Что касается долготных распределений максимумов интенсивности, относящихся к $L \sim 1.12 - 1.18$, $1.22 \leq L < 1.30$, то они, как видно на рис. 7, 8, более равномерные. Наблюдающееся некоторое повышение концентрации максимумов интенсивности к западу от ЮАА также может быть объяснено особенностями долготного распределения магнитного поля — изолинии L , B на рис. 2, 3.

Таким образом, можно заключить, что повышенные потоки электронов в приэкваториальных областях концентрируются на соответствующих дрейфовых оболочках, а наблюдающееся долготное распределение обусловлено особенностями конфигурации магнитного поля на высотах орбит спутников Вернов и POES.

Следует отметить, что с учетом наблюдений на большой временной базе — 14 лет, а, принимая во внимания данные экспериментов на ОС “Мир” —

более 20 лет, можно сделать вывод о том, что потоки электронов на малых L -оболочках присутствуют постоянно и слабо зависят от уровня геомагнитной активности и параметров межпланетной среды. С другой стороны, стабильные потоки электронов могут существовать на данной дрейфовой оболочке в тех случаях, когда их время жизни превышает дрейфовый период, то есть когда можно считать электроны захваченными. Такая ситуация может реализоваться для оболочек с относительно большим L . На дрейфовых оболочках, характеризуемых малыми значениями L (< 1.2), из-за стока в ЮАА, они не должны существовать более одного дрейфового периода. При этом, как следует из теории адиабатического движения, раствор конуса потерь стремится к 90° при $L \rightarrow 1$, в результате чего на высотах менее 800 км в приэкваториальных областях кроме зоны ЮАА стабильные потоки заряженных частиц, в том числе электронов существовать вообще не должны.

Наличие же таких потоков в низкоширотных областях, где время жизни электронов заведомо меньше дрейфового периода, требует предположить, что существуют постоянно действующие

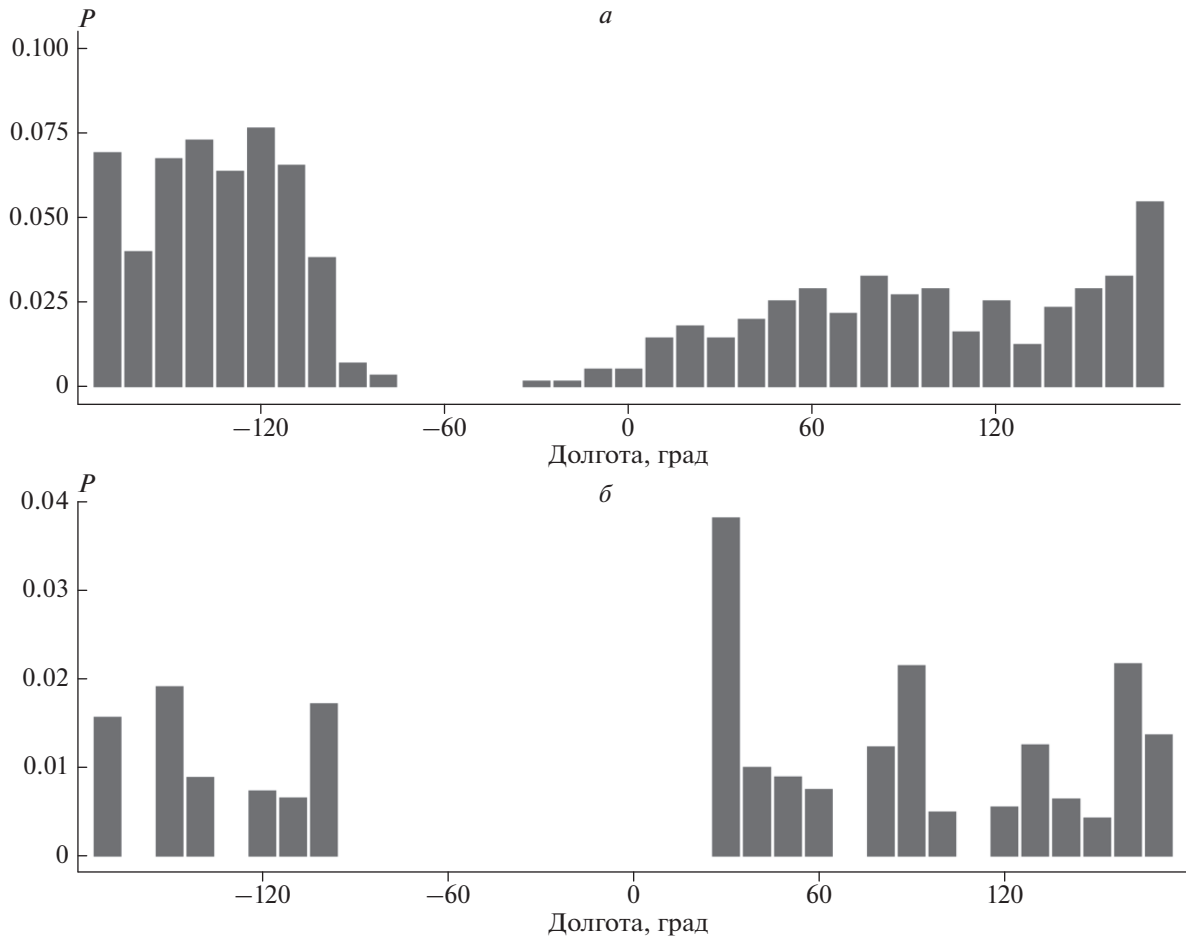


Рис. 8. Долготное распределение максимумов потоков электронов на $1.22 < L < 1.3$ по данным NOAA POES-15 (а), РЭЛЕК Вернов (прибор ДРГЭ-1) (б).

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, высыпающих (вследствие рассеяния на остаточной атмосфере) вдоль восточной периферии ЮАА на дрейфовые оболочки, характеризующиеся значениями 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 $\sim 1.2-1.3$, которые наблюдались, в том числе в экспериментах на ОС “Мир” [Богомолов и др., 2005].

Результаты измерений на спутниках Вернов и POES показывают, что значимые потоки электронов могут существовать и на более “низких” дрейфовых оболочках $L \sim 1.10-1.15$ 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 учетом данных измерений на спутни-

ках 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 пришелся 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 поперек 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 [Dwyer et al., 2008; Briggs et al., 2011]. В пользу этого может свидетельствовать то, что, как видно из глобального пространственного распределения электронов на малых L (см. рис. 2, 3), 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

грозовой 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.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе совместного анализа данных экспериментов на спутниках Вернов и РОЕС показано существование значимых потоков электронов субрелятивистских энергий на дрейфовых оболочках, характеризуемых значениями параметра МакИлвайна $L < 1.5$. Подтверждены результаты предыдущих экспериментов, в том числе на ОС “Мир” по наблюдению повышенных потоков электронов на $L \sim 1.4$ и ~ 1.2 – 1.3 . Показано, что значимые потоки электронов стабильно существуют также на $L \sim 1.10$ – 1.15 и ~ 1.04 – 1.05 .

Измеренное долготное распределение потоков электронов на указанных дрейфовых оболочках свидетельствует о том, что, по-видимому, наблюдающиеся потоки “привязаны” к этим оболочкам, а неоднородности долготного распределения обусловлены особенностями конфигурации магнитного поля на орбитах спутников.

Стабильное существование потоков электронов на $L \sim 1.10$ – 1.15 и ~ 1.04 – 1.05 в течение месяцев и даже лет свидетельствует о постоянно действующем механизме подпитки электронами указанных оболочек. В качестве одного из возможных механизмов рассматривается инжекция электронов в околоземное пространство во время высотных электромагнитных разрядов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-57 06002\18), а также Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики. Эксперимент на ИСЗ Вернов осуществлялся в рамках Федеральной космической программы Российской Федерации на средства Федерального космического агентства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– 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 в околоземном пространстве на дрейфовых оболочках $L < 2$ // Космич. исслед. Т. 43. С. 322–330. 2005.
 – Братолобова-Цулукидзе Л.С., Грачев Е.А., Григорян О.Р., Печев О.Ю. Приэкваториальные электроны по данным ОК МИР // Космич. исслед. Т. 39. № 6. С. 602–612. 2001.
 – Гальперин Ю.И., Джорджио Н.В., Иванов И.Д. и др. Исследование геоактивных корпускул и фотоэлектронов на спутнике Космос-261. 2. Измерение электронов малых энергий // Космич. исслед. Т. VIII. Вып. 1. С. 108–119. 1970.

– Кудрявцев М.И., Панков В.М., Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я., Логачев Ю.И., Свертилов С.И. Эксперимент “ГРИФ-1” на модуле “Спектр” ОК “Мир”: исследование рентгеновского, гамма- и нейтронного излучений солнечных вспышек, а также связи солнечной активности с динамикой потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 39. С. 1539–1545. 1996.

– Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В и др. Эксперимент на спутнике Вернов: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. I. Описание эксперимента // Космич. исслед. Т. 54. № 4. С. 277–285. 2016а.

– Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В и др. Эксперимент на спутнике Вернов: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. II. Первые результаты // Космич. исслед. 2016. Т. 54. № 5. С. 369–376. 2016б.

– Abel B.R., Vampola A.L. Energetic electron precipitation from the inner zone // Geophys. Res. Lett. V. 24(16). P. 1983–1986. 1997.

– Briggs M.S., Connaughton V., Wilson-Hodge C. et al. Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM // Geophys. Res. Lett. V. 38(2). 2011. <https://doi.org/10.1029/2010GL046259>

– Dwyer J.R., Grefenstette B.W., Smith D.M. High-energy electron beams launched into space by thunderstorms // Geophys. Res. Lett. V. 35(2). <https://doi.org/10.1029/2007GL032430>

– Grigoryan O.R., Panasyuk M.I., Petrov V.L., Sheveleva V.N., Petrov A.N. Spectral characteristics of electron fluxes at $L < 2$ under the Radiation Belts // Adv. Space Res. V. 42(9). P. 1523–1526. 2008.

– Gusev A.A., Kohno T., Martin I.M., Pugacheva G.I., Turtelli Jr. A., Tylka A.J., Kudela K. Injection and fast radial diffusion of energetic electrons into the inner magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 43. P. 1131–1134. 1995.

– Hayakawa S., Kato F., Khono T., Murakami T., Nagase F., Nishimura K., Tanaka Y. Existence of geomagnetically trapped electrons at altitudes below the inner radiation belt // J. Geophys. Res. V. 78. P. 2341–2343. 1973.

– Heikkila W.J. Soft particle fluxes near the equator // Geophys. Res. V. 76. P. 1076–1078. 1971.

– Hill R.W., Grader R.J., Seward F.D., Stoering J.P. Soft particle flux above 130 km at mid-latitude // Geophys. Res., V. 75. P. 7267–7271. 1970.

– Kohno T. Rocket observations of suprathermal electrons in the energy range 6.5–23 keV at midlatitude // Geomagn. Geoelect. V. 25. P. 131–144. 1973.

– Krasovskii V.I., Kushner Yu.M., Bordovskii G.A., Zakharov G.F., Svetlitskii E.M. The observation of corpuscles by means of the third artificial earth satellite // Planet. Space Sci. V. 5. P. 248–249. 1961.

– Lazutin L. On radiation belt dynamics during magnetic storms // Adv. Space Res. V. 49. P. 302–315. 2012.

– Nagata K., Kohno T., Murakami H., Nakamoto A., Hasebe N., Kikuchi J., Doke T. 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. V. 36. P. 591–606. 1988.

– Rodger C.J., Clilverd M.A., Green J.C., Lam M.M. Use of POES observations to examine radiation belt dynamics and energetic electron precipitation into the atmosphere // J. Geophys. Res. V. 115. A04202. 2010. <https://doi.org/10.1029/2008JA014023>