

## О СТРУКТУРЕ ВОЗМУЩЕННОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

© 2004 г. Л. Лазутин

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

Поступила в редакцию 22.04.2004 г.

Область квазизахвата на ночной стороне возмущенной магнитосферы в большинстве моделей либо вовсе отсутствует, либо сливается с плазменным слоем хвоста магнитосферы. Вместе с тем, это две различные области, и по топологии магнитного поля, и по характеру движения заряженных частиц. Более того, именно область квазизахвата сопряжена с зоной активных форм полярных сияний, т.е. может называться авроральной магнитосферой. Модели магнитосферы, в которых хвостовые структуры магнитного поля примыкают непосредственно к границе стабильного захвата, в частности модель “изотропной границы”, основаны на ошибочных предположениях. Понимание процессов магнитосферных суббурь и магнитных бурь зависит от правильного представления о структуре магнитосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Казалось бы, конфигурация магнитосферы давно и основательно изучена, по крайней мере, по основным, крупномасштабным, структурным образованиям, и разногласия давно должны были бы устранены анализом экспериментальных фактов. Тем не менее, есть одна область, которая игнорируется во многих магнитосферных моделях, что приводит к терминологической путанице и в конечном итоге вызывает искаженное представление о происходящих в магнитосфере процессах. Речь идет о ночной области квазизахвата (ОКЗ), образовании, расположенном между границей стабильного захвата (ГСЗ) и хвостом магнитосферы (рис. 1). По структуре магнитного поля, по популяции частиц и их динамике область квазизахвата резко отличается от хвоста магнитосферы, с которым ее часто отождествляют. В ранних работах область квазизахвата действительно рассматривалась как самостоятельная, ее называли областью неустойчивой радиации, ночным каспом, в давней монографии автора предлагалось наименование “авроральная магнитосфера” [1]. Когда же представления о хвосте магнитосферы как о месте зарождения и развития активных процессов суббури стало превалирующим, область квазизахвата исчезла из обихода и на схемах магнитосферы, хвост стал примыкать непосредственно к границе устойчивого захвата (рис. 2).

О’Брайен [2], который был автором этой схемы, объединил под названием “авроральная радиация” ночной касп и плазменный слой, чтобы выделить область, где значительные потоки заряженных частиц появляются лишь эпизодически, в отличие от области стабильного захвата. Он при этом говорил о различной топологии этих двух областей, однако эта оговорка забывается при

многочисленных повторах или модификациях модели О’Брайена.

В наше время понимание того, что активные процессы суббури протекают не только или не столько в хвосте магнитосферы, но именно на замкнутых квазидипольных силовых линиях, стало всеобщим. Однако терминология осталась прежней, и при описании процессов, происходящих в области квазизахвата, применяются наименования нечеткие, либо не отражающие физической сути, например, геостационарная область или внутренняя магнитосфера, либо ее искажающие, например “центральный плазменный слой хвоста магнитосферы”. Дело, однако, не только в терминологии, сохраняются неверные представления о геометрии возмущенной магнитосферы и о процессах, формирующих эту геометрию. Одно из устойчивых заблуждений – о так называемой

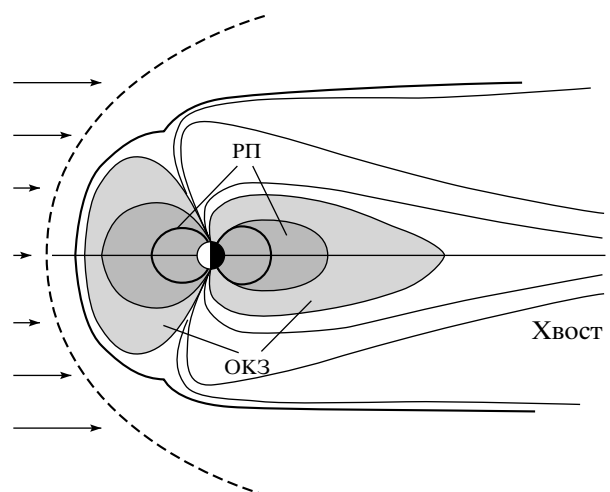


Рис. 1. Структура магнитосферы.

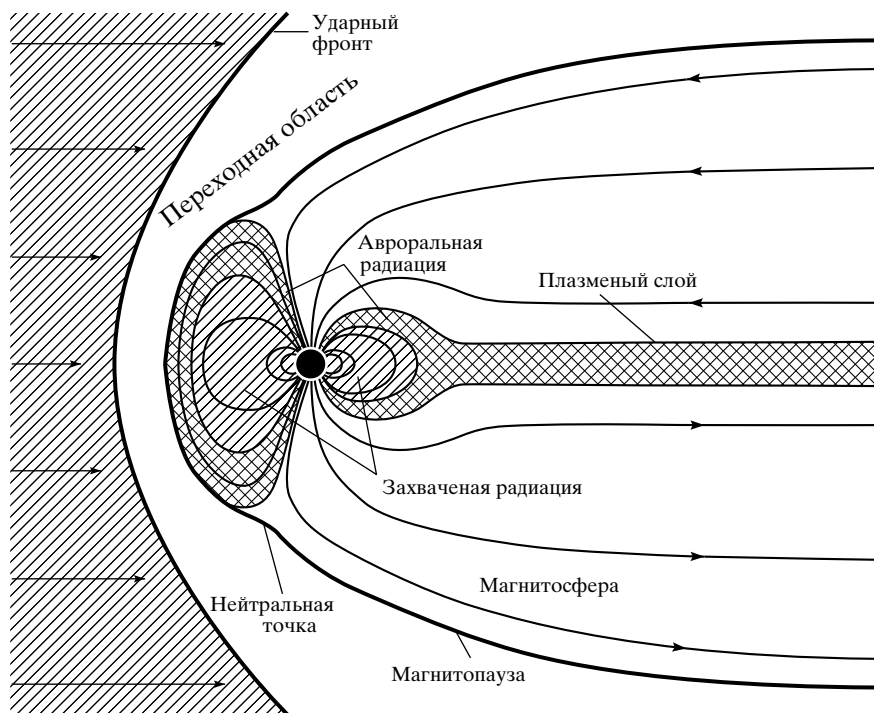


Рис. 2. Модель магнитосферы без ОКЗ.

“изотропной границе” захваченных протонов как об индикаторе перехода к “хвостовой” структуре магнитного поля в ночном секторе сразу от границы стабильного захвата.

### О ГРАНИЦЕ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

Расчеты изотропной границы. Значительное распространение получило представление о том, что область устойчивого захвата, радиационный пояс, резко обрывается и фактически граничит с областью вытянутых в хвост силовых линий. Это представление основывается на наблюдениях изотропных потоков частиц на низковысотных спутниках и объясняется следующим образом. При движении спутника к высоким широтам наблюдается переход питч-углового распределения (ПУР) регистрируемых частиц от захваченного к изотропному в связи с тем, что на экваторе радиус кривизны силовой линии  $R_k$  уменьшается до величины, сравнимой с ларморовским радиусом частицы, вследствие чего устанавливается режим сильной диффузии по питч-углам. В результате образуется область изотропного распределения захваченных протонов, границу которой предлагается использовать как индикатор перехода от квазидипольных силовых линий к вытянутым в хвост, как границу магнитосферной ловушки. [3–5]. В результате приходится часто сталкиваться с трактовкой изотропной границы как границы

между областью стабильного захвата и хвостом магнитосферы. В таком подходе для области квазизахвата действительно нет места. В чем же заключается просчет модели изотропной границы?

Диффузия частиц по питч-углам вследствие большой кривизны силовых линий ловушки существует без сомнения, наряду с диффузией при взаимодействии волна-частица. Наиболее аккуратно влияние топологии магнитного поля на ПУР частиц в магнитосферной ловушке исследовано в работах Кузнецова и др. [6] методом прямых траекторных расчетов. Получены соотношения величины изменения питч-угла  $\Delta\alpha$  на скачке в зависимости от отношения ларморовского радиуса к радиусу кривизны силовой линии  $s = \rho/R_k$ . Показано, что величина  $\Delta\alpha$  не зависит от исходного питч-угла частицы. Для дипольного поля и модели Цыганенко  $\Delta\alpha$  приближается к величине конуса потерь при  $s = 0.3$ . Когда для частиц с малыми питч-углами изменение  $\Delta\alpha$  за один скачек становится сравнимым с самой величиной питч-угла, это действительно приводит к изотропному ПУР вблизи конуса потерь.

Означает ли это, что режим сильной диффузии установится во всей силовой трубке? Конечно же нет. Для захваченной частицы изменение питч-угла на несколько градусов за один скачек означает режим весьма умеренной диффузии. Это ясно априори, но для наглядности мы провели простое моделирование диффузии частиц при разных величинах  $s$ , и в качестве примера на рис. 3

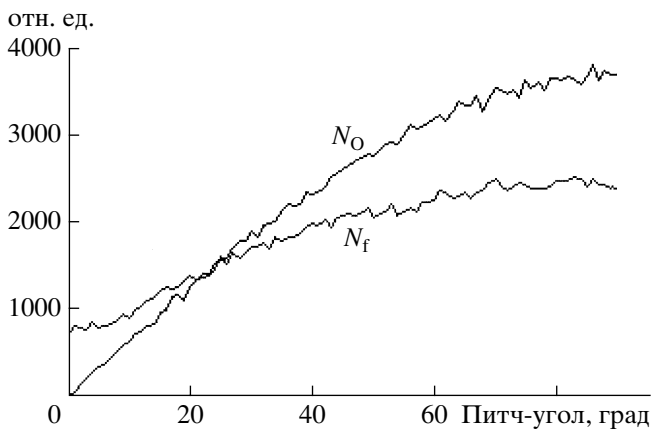


Рис. 3. Моделирование питч-угловой диффузии частиц при умеренной диффузии.

приведен результат трансформации ПУР после 100 скачков при  $s = 0.3$ . ПУР действительно становится изотропным вблизи конуса потерь, т.е. в зоне пролета низковысотного спутника, но остается захваченным в подавляющей части объема силовой трубки.

Таким образом, “изотропная граница” всего лишь указывает расстояние, начиная с которого в магнитосферной ловушке для данного сорта и энергии частиц начинает работать умеренная диффузия по питч-углам.

На рис. 4 приведены результаты измерения потока частиц, электронов с энергией 0.3–0.6 МэВ и протонов с энергией 1–6 МэВ 26.X.2003 г. при пролете радиационных поясов и полярной шапки спутника Коронас-Ф на высоте 500 км. В это время в межпланетном пространстве присутствовали протоны и электроны солнечного происхождения, они свободно проникали в полярную шапку и наглядно высвечивали структуру магнитосферы. Мы видим полярную шапку в центре рисунка равномерно заполненную солнечными частицами. Спад потока электронов на границе полярной шапки указывает на внешнюю границу ОКЗ, внутренняя ее граница примыкает к максимуму внешнего пояса. В отличие от электронов, солнечные протоны, имеющие большую жесткость, проникают глубже, спад интенсивности начинается вблизи внешней границы ОКЗ, а фоновая граница совпадает с внутренней границей ОКЗ.

Диффузия, магнитный дрейф и расщепление оболочек. Асимметрия магнитного поля Земли приводит к тому, что дрейфовые траектории захваченных частиц остаются замкнутыми на радиальных расстояниях меньше определенной, именуемой границей стабильного захвата. За границей стабильного захвата магнитный дрейф выводит частицу на границу магнитосферы, в переходную область. Несколько процессов размы-

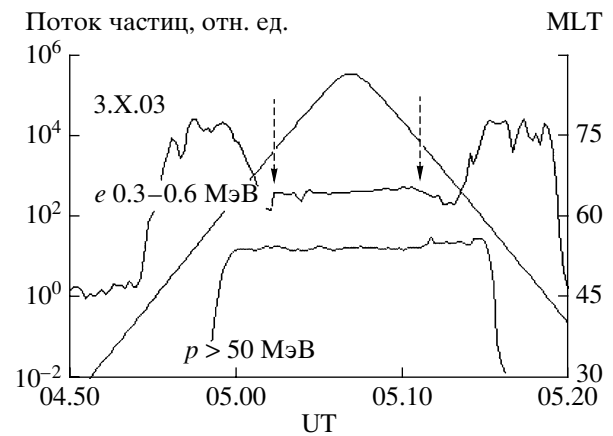


Рис. 4. Пример пролета спутника Коронас-Ф через полярную шапку.

вает ГСЗ, делает ее пологой. Сама асимметрия магнитосферы все время дышит, иногда меняется значительно, кроме того, радиальная диффузия на всей траектории дрейфа и сильная диффузия на флангах позволяет определенному количеству частиц из области квазизахвата совершать один или несколько полных оборотов вокруг Земли.

На рис. 5 структура ОКЗ прослеживается в измерениях энергичных электронов и ионов на спутнике *CRRES* вблизи плоскости экватора. В отличие от рис. 4, здесь взят пролет в возмущенное время. Две популяции частиц легко выделяются глазом – уменьшающиеся с расстоянием потоки “старых” захваченных частиц радиационного пояса и ускоренная во время суббури авроральная радиация. Сразу после основной инжекции мы видим всплеск “эхо” с дисперсией по энергиям – это возвращаются частицы, которым удалось совершить полный оборот вокруг Земли. Многочисленны наблюдения эхо на геостационарных спутниках, есть наблюдения и на больших расстояниях, до  $15R_E$ .

Поток частиц упорядоченно падает с расстоянием на два порядка, прежде чем обнаруживаются признаки фоновой границы. До этого сохраняются характерные для ОКЗ питч-угловое распределение частиц, меняющееся с расстоянием от захваченного к распределению типа “бабочки”, с провалом интенсивности вблизи  $90^\circ$ . Этот эффект, известный как эффект расщепления дрейфовых оболочек, наблюдался неоднократно при пролетах космических аппаратов через полуночный сектор магнитосферы в районе магнитного экватора.

Регулярная структура радиального профиля области квазизахвата, сохраняющаяся в спокойное время несколько дней, говорит о том, что питч-угловая диффузия частиц здесь достаточно умеренная. Даже электроны с энергией выше

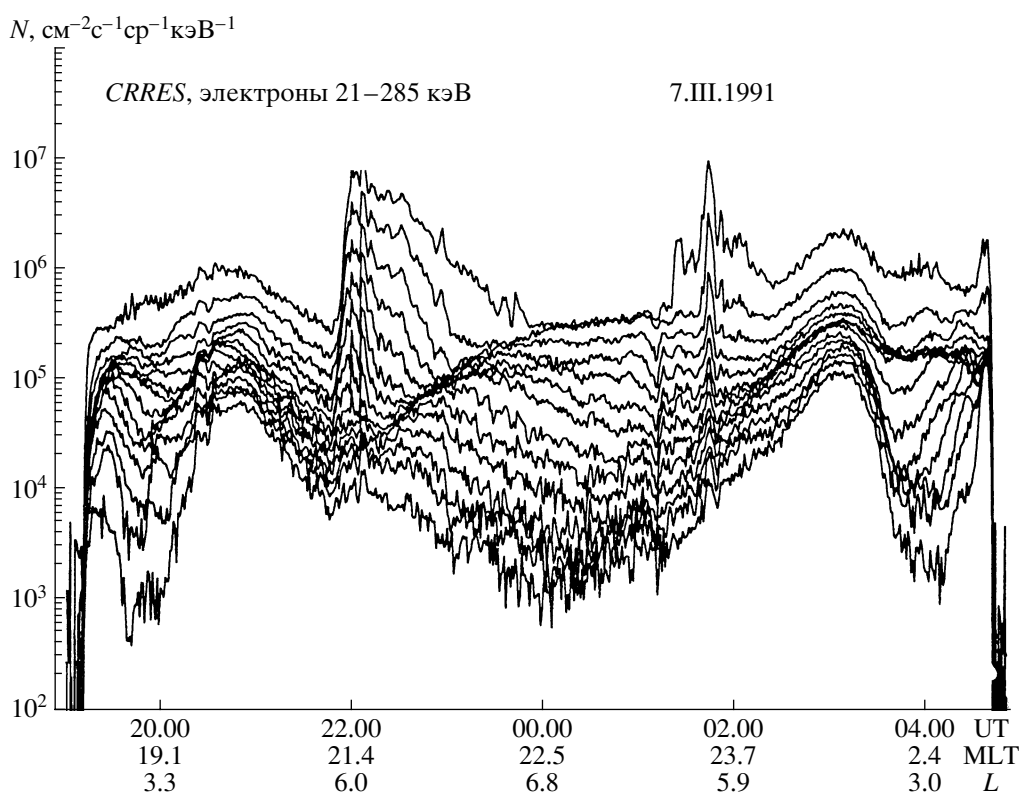


Рис. 5. Пример измерения энергичных частиц и магнитного поля в плоскости экватора на спутнике *CRRES*.

1 МэВ, имеют в геостационарной области период спада интенсивности после инъекции несколько суток. Увеличивающаяся с расстоянием кривизна магнитных силовых линий, пульсации и волны, особенно значительные в полуночном секторе, действительно приводят к питч-угловой диффузии и сбросу частиц в конус потерь и гибели в атмосфере, однако большая часть дрейфового периода частиц приходится на дневную полусферу, полуночный сектор проскакивается быстро и без катастрофических потерь.

#### БУРИ И СУББУРИ. ГРАНИЦЫ И ПРОЕКЦИИ ОКЗ

В магнито-спокойные периоды ОКЗ утрачивает свое самостоятельное значение, – это просто склон радиационного пояса. С началом возмущений, еще на подготовительной фазе суббури, усилением электрического поля конвекции сюда продвигается внутренняя граница плазменного слоя, плазма при этом разогревается адиабатически и в ОКЗ теперь две популяции частиц, радиационный пояс и плазма ЦПС. И уже на подготовительной фазе появляется и на активной фазе нарастает третья популяция, авроральные протоны и электроны.

Инъекция энергичных частиц и активизация полярных сияний совпадают во времени и в про-

странстве, и тот факт, что все это происходит на замкнутых силовых линиях, в ОКЗ, неоднократно подтвержден экспериментально (см. [7] и цитируемую литературу).

Высыпание авроральных частиц, преимущественно электронов, очерчивает визуально границы ОКЗ, охваченной активизацией, в виде зоны активных сияний. Экваториальная граница располагается ближе или дальше от максимума внешнего радиационного пояса, в зависимости от величины электрического поля конвекции, и меняет свое положение медленно. Полюсная граница определяется суббуревыми токами и движется быстро – к Земле на подготовительной фазе и от Земли в хвост с началом экспансии. Обе границы неоднородны по азимуту, в большей степени внешняя. Судя по измерению дропаутов [8], внешняя граница в возмущенное время обрывается круто, одновременно для электронов и протонов в широком диапазоне энергий. Плазменный слой хвоста магнитосферы проектируется на приполюсную дугу зоны полярных сияний или внешнюю область двойного овала.

Нигде так ярко не процветает терминологическая путаница, как при описании или моделировании токовых систем возмущенной магнитосферы. Сплошь и рядом токи, протекающие в ОКЗ, именуются токами хвоста магнитосферы. Трудно

сказать, почему это происходит, у токов в ОКЗ и в хвосте разная природа и разные носители.

Токи в плазменном слое хвоста магнитосферы, направленные с востока на запад, создаются благодаря движению кэвных электронов, отражающихся попеременно от северной и южной границ тонкого плазменного слоя. В ОКЗ основным токообразующим элементом являются авроральные протоны (ионы) с энергией от 10 до ~200 кэВ. Они захвачены в магнитосферную ловушку, и хотя адиабатические инварианты могут не сохраняться, характер их движения такой же, как у частиц радиационных поясов – ларморовское вращение, осцилляции между зеркальными точками и магнитный дрейф.

В модели магнитного поля октябрьской бури [9] хорошее совпадение измеренного и рассчитанного хода  $D_{st}$  достигается введением тока, расположенного на ночной стороне на  $R > 3R_E$  и направленного с утренней на вечернюю сторону. Авторы называют этот ток током плазменного слоя хвоста магнитосферы, но с таким же успехом его можно назвать и током квазизахваченных ионов, модели безразлично, как этот ток называется. А для нас важно представлять, какими носителями этот ток создается и каково их происхождение.

В выборе между этими двумя возможностями экспериментальные данные полученные в октябре 2003 говорят в пользу токов ОКЗ. Граница центрального плазменного слоя действительно сдвинута к Земле на главной фазе бури, но, как следует из измерений электронов 10 кэВ на спутнике Метеор, потоки их не превышают уровня рядовой суббури и не способны создать необходимую по мощности токовую струю. А вот наблюдение на этих широтах активных суббуревых полярных сияний указывает на возможность появления инъекций энергичных частиц и четко связывает их с зоной квазизахвата.

Так или иначе, без правильного представления о структуре магнитосферы невозможен прогресс в понимании процессов во время бури.

Казалось бы обилие экспериментального материала должно сдерживать фантазию. Природа и источники частичного кольцевого тока изучаются давно и многое уже ясно. Но теоретическая мысль не стоит на месте, и появляются модели типа “магнитные бури без суббурь” [10]. Как избавиться от суббурь? Очень просто – надо выбросить ОКЗ, и все, что находится дальше границы стабильного захвата, считать хвостом магнитосферы. Для суббурь действительно не остается места.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прошло уже более десяти лет после первой конференции по суббурям в Кируне, на которой было достигнуто согласие по вопросу о существо-

вании двух зон суббуревой активности. Казалось бы необходимо скорректировать представления о топологической модели магнитосферы. Однако не каждый может легко отказаться от собственных результатов и убеждений. Сторонники понятий и терминологии, сложившихся в тот период, когда все активные процессы в возмущенной магнитосфере проектировали в хвост магнитосферы, нашли простой выход – разделили хвост на три части – ближний, средний и дальний. Одни процессы происходят в ближнем хвосте, другие – в среднем, и кирунское согласие учитывается, и преемственность работ сохраняется. Вместе с тем, такой терминологический компромисс сохраняет неверные представления о топологии магнитосферы и тормозит прогресс.

Сейчас, когда самые преданные хвостовики вынуждены признавать, что суббури могут начинаться и развиваться на квазидипольных силовых линиях, необходимо привести в соответствие и понятия, и модели, и терминологию.

Прежде всего, необходимо вернуть понятию “хвост магнитосферы” его начальное и точное определение, как области с вытянутыми параллельными силовыми линиями с малой вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, с тонким плазменным слоем и интенсивностью энергичных частиц лишь изредка превышающей фон космических лучей. Необходимо признать, что между хвостом и границей устойчивого захвата существует область в спокойное время населенная лишь квазизахваченными частицами радиационного пояса, от максимума до фоновой границы, а в возмущенное время заполненная горячей плазмой и авроральными частицами с энергией в десятки и сотни кэВ. Эта область, именуемая здесь областью квазизахвата, ОКЗ, (а в других работах – геостационарной областью, внутренней магнитосферой, центральным или ближним плазменным слоем, авроральной магнитосферой) – не геометрическое понятие, а важная физическая структура, именно в ней происходит значительная часть активных процессов суббурь и мировых магнитных бурь.

Необходимо, наконец, отказаться от схем и моделей, объединяющих ОКЗ с плазменным слоем хвоста магнитосферы и от хвостовой лингвистики. Невозможно исследовать физические процессы суббурь или мировых бурь, основываясь на заведомо неправильной топологии области, в которой эти процессы протекают. Иначе исследование виртуальных процессов в виртуальных магнитосферах окончательно вытеснит исследования реальной магнитосферы Земли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lazutin, L.L.* X-ray emission of auroral electrons and magnetospheric dynamics. Berlin-Heidelberg: Physics and Chemistry in Space. Springer-Verlag, 1986. V. 14.
2. *O'Brien, B.J.* Relation of the auroral zone to the magnetopause and to Van Allen radiation // *Space physics / Ed. by D.P. LeGalley and A. Rosen.* New York, ch14. 1964.
3. *Imhof W.L.*, Fine Resolution Measurements of the L-Dependent Energy Threshold for Isotropy at the Trapping Boundary // *J. Geophysical Res.* 1988. V. 93. № A9. P. 9743–9752.
4. *Сергеев В.А., Цыганенко Н.А.* Границы захвата и потери частиц внешнего радиационного пояса, обусловленные магнитосферным магнитным полем // *Космич. Исслед.* 1982. Т. 20. № 6. С. 866.
5. *Sergeev V.A., Malkov M.V. and Mursula K.* Testing the isotropic boundary algorithm method to evaluate the magnetic field configuration in the tail // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 7609–7620.
6. *Кузнецов С.Н., Рыбаков А.Ю.* Нарушение адиабатичности движения энергичных частиц на границе захвата в магнитосфере Земли // *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия.* 2000. № 5. С. 47–50.
7. *Лазутин Л.Л.* Структура авроральной магнитосферы и взрывные процессы магнитосферной суббури // *Физика околоземного космического пространства.* Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН. 2000. Т. 2. С. 145–192.
8. *Sauvaud J.A. and Winckler J.R.* Dynamics of plasma, energetic particles and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 2043–2056.
9. *Панасюк М.И. и др.* Магнитные бури в октябре 2003 // *Космич. Исслед.* 2004. Наст. выпуск.
10. *Maltsev Y.P.* Non-substorm Mechanism for Magnetic Storms // *Substorm-6.* 2002. P. 848–849.

**Рис. 6.** Проекция ОКЗ и хвостовой части плазменного слоя на зону полярных сияний.