

УДК 52-854

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПАНСИИ К ПОЛЮСУ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

© 2014 г. Л. Л. Лазутин

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
e-mail: ll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 13.05.2013 г.
После доработки 07.06.2013 г.

Исследуются случаи смещения в высокие широты внешней границы электронного пояса, свидетельствующие о расширении к полюсу зоны квазизахвата ночной магнитосферы. Показано, что эти события вызываются суббуревой активностью, которая, смещаясь в высокие широты, может приводить к развитию так называемых суббурь полярной шапки. Показано, что высокоширотные всплески энергичных электронов могут генерироваться в такого рода суббурах аналогичным образом тому, как это происходит в классических суббурах авроральной зоны.

DOI: 10.7868/S0016794014020126

1. ВВЕДЕНИЕ

Положение внешнего радиационного пояса энергичных электронов испытывает значительные вариации. Внимание исследователей сосредоточено на динамике радиационного пояса во время магнитных бурь, с характерным движением к Земле максимума пояса и его границ на главной фазе и возвратного движения от Земли на фазе восстановления. Причиной такого внимания является нерешенность проблем ускорения и потерь частиц при радиальном переносе вглубь магнитосферы и практических приложений радиационной опасности.

Экспансии приполюсной границе радиационного пояса, ее движению к полюсу уделялось в последнее время меньше внимания. Более того, смещенные к полюсу возрастания потоков электронов обычно трактовались как явление внешнее по отношению к поясу, как отдельные “острова” [Anderson et al., 1965, McDiarmid and Burrows, 1965]. Вместе с тем возрастания интенсивности энергичных электронов во время активной фазы суббури – явление общеизвестное и хорошо изученное, и пространственно оно располагается на внешнем склоне радиационного пояса [Lazutin and Korth, 1998], так что, по крайней мере, часть таких возрастаний в зоне полярных сияний может лишь выглядеть как изолированные “острова” вне радиационного пояса. Кроме того, часть суббурь во время которых ускоряются энергичные электроны, действительно, может сдвигаться в область, традиционно относящуюся к полярной шапке.

Исследуя зависимость размеров и границ зоны полярных сияний, Старков и Фельдштейн [1967] еще в шестидесятых годах показали, что с ростом магнитной активности границы зоны расширя-

ются как к экватору, так и к полюсу. На большом статистическом материале Newill et al. [1996] установили, что полярная граница овала сияний (центрального плазменного слоя) и фоновая граница электронного радиационного пояса совпадают как в спокойное, так и в возмущенное время. Даже, если усомниться в том, что совпадение точное, динамика этих двух границ управляется изменением структуры ночного сектора магнитного поля магнитосферы, а, следовательно, должна идти в одном направлении.

Исследованию суббурь за пределами зоны полярных сияний посвящено небольшое число работ, [Loomer and Gupta, 1980; Gussenhoven, 1982; Hones, 1985], в которых рассматриваются несколько явлений, по-видимому, разной природы. Связь полярной экспансии аврорального электроджета и полярных сияний с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля рассматривается в статье [Дэспирак и др., 2008], в которой можно найти анализ результатов более ранних работ. В ней, однако, не выделяются различные типы явлений, приводящих к высокоширотной экспансии, которых, очевидно несколько. Одно из таких явлений, названное авторами полярными магнитными суббурами, наблюдается в предполуночные часы при отсутствии суббурь в авроральной зоне в условиях умеренной магнитной активности [Клейменова и др., 2012]. Магнитные бухтообразные возмущения в этих событиях подобны суббуревым бухтам авроральной зоны, но пульсации и полярные сияния отличаются от классических суббурь.

Еще одна группа явлений, названная авторами суббурами полярной шапки, была исследована в нескольких работах [Nielsen et al., 1988; Weather-

wax et al., 1997; Doolittle et al., 1998; Mende et al., 1999]. Наблюдается этот тип суббурь в высоких широтах за спокойной границей полярной шапки в том же долготном секторе, что и “нормальные” суббури, и сопровождаются тем же набором проявлений в сияниях, вариациях и пульсациях магнитного поля. Важно, что во время суббурь полярной шапки наблюдается авроральное риометрическое поглощение, что свидетельствует об ускорении электронов с энергией в десятки кэВ.

Прямая связь всплесков энергичных электронов с суббурями полярной шапки была обнаружена в работе [Kuznetsov et al., 2001], когда наряду с магнитными бухтами в полярной шапке и всплесками риометрического поглощения измерялись и возрастания энергичных электронов с энергией >0.3 МэВ на низковысотном спутнике с полярной орбитой КОРОНАС-И (далее К-И).

Настоящая работа является продолжением исследования на спутнике КОРОНАС-И с той разницей, что в 2004 году магнитная и суббуревая активность были намного выше, чем во время минимума цикла солнечной активности, когда работал К-И, что позволило выявить новые особенности полюсной экспансии радиационного пояса на базе измерений на спутниках КОРОНАС-Ф и SERVIS-1.

2. ИЗМЕРЕНИЯ

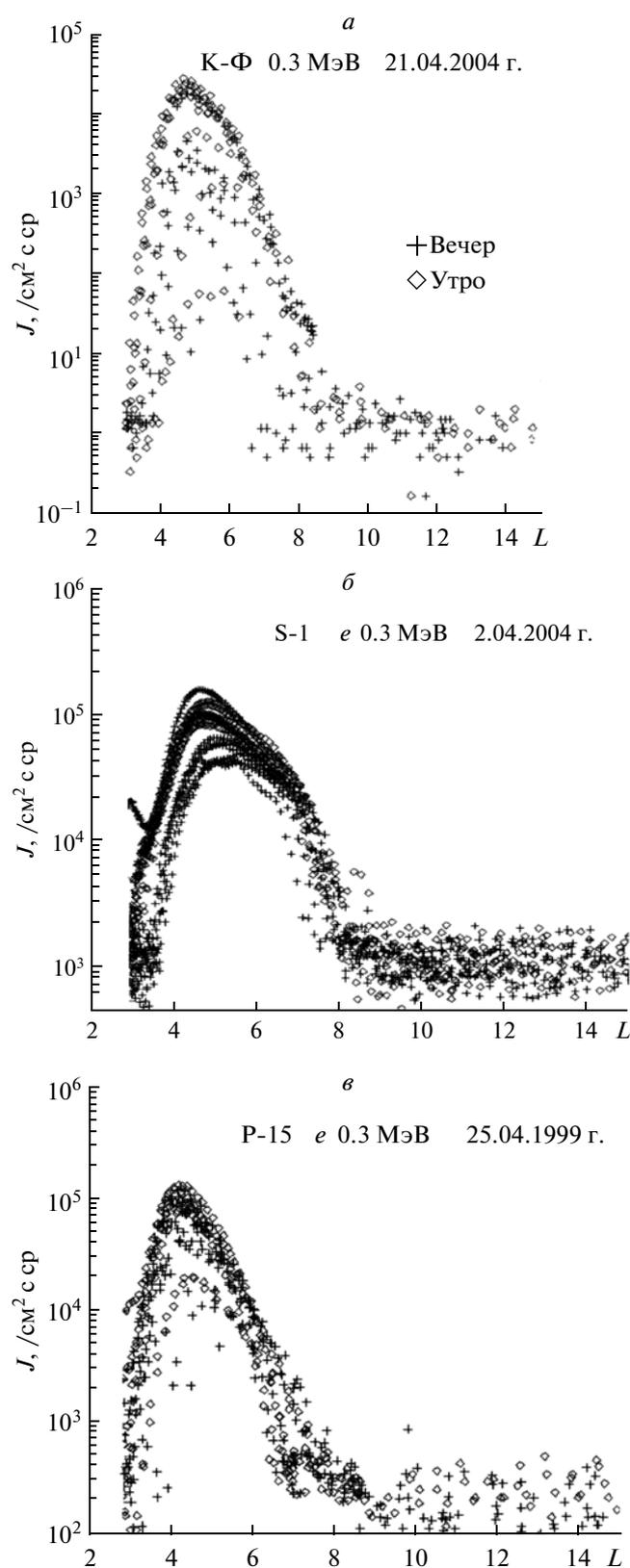
Низковысотные спутники с полярной орбитой КОРОНАС-Ф (далее К-Ф) и SERVIS-1 (далее S-1) на высотах 500 и 1000 км соответственно, первый работал в 2001–2005, а второй в 2003–2005 годах. Нами использовались измерения энергичных электронов на спутнике К-Ф в канале телескопа 0.3–0.6 МэВ и на S-1 в каналах 0.3–1.7 МэВ и 1.7–3.4 МэВ. Подробное описание полетного оборудования приведено в работах [Kuznetsov et al., 2002] и [Kodaira et al., 2005].

Для оценки уровня возмущенности использовался 3-х часовой Kp -индекс, достаточно адекватно отражающий уровень суббуревой активности в авроральной зоне; для определения фазы суббури и широты эпицентра активизации — измерения на меридиональных цепочках магнитометров, на которых есть и авроральные, и высокоширотные станции. Мы воспользовались данными двух таких цепочек: скандинавской сети IMAGE [Viljanen and Nakkinen, 1997] и канадской — CANOPUS [Mann et al., 2008]. Полуночный сектор первой из них приходится приблизительно на интервал 17–03 UT, второй — 03–13 UT. В эти интервалы мирового времени попало достаточно много измеренных широтных профилей внешнего радиационного пояса, частично сдвинутых в высокие широты, примеры анализа таких полетов приводятся ниже.

2.1. Спокойные радиальные профили. На рисунке 1 (а, б) показаны примеры измерения радиальных профилей электронов >0.3 МэВ за несколько часов спокойной магнитной обстановки на спутниках К-Ф и S-1. Приведены все измерения подряд без отбора, по четыре профиля за каждый облет Земли, как в северном так и в южном полушариях на восходящих и нисходящих орбитах. Наблюдается подобие структур внешнего пояса на этих спутниках, причем аналогичная картина повторяется не только в течение нескольких часов, но и изо дня в день. На рисунке 1в приведены аналогичные изменения на спутнике POES-15 в канале 0.3 МэВ 90° , который на широтах $L > 1.7$ измеряет электроны, захваченные в радиационном поясе, а не высыпавшиеся частицы [Roger et al., 2010]. Положение максимумов потока электронов в радиальных профилях внешнего пояса на всех спутниках совпадает, интенсивность в максимуме меняется в пределах одного порядка. Вариации происходят вследствие того, что меняется направление угла зрения детектора по отношению к направлению магнитной силовой линии (этот эффект особенно велик у К-Ф) и, кроме того, часть орбит проходит над Бразильской магнитной аномалией, где по известным причинам поток измеряемых захваченных частиц выше. Измеренные значения фоновой границы пояса на $L = 8–9$ не намного отличаются от положения приполюсной границы спокойного аврорального овала ($L \sim 10$). На этих рисунках и дальше измерения условно поделены на утренние (0–12 LT) и вечерние (12–24 LT).

2.2. Радиальные профили во время суббуревой активности. При повышенной суббуревой активности (но в отсутствии магнитных бурь) потоки энергичных электронов, действительно, могут регистрироваться на широтах выше спокойной фоновой границы. Можно отметить два типа полюсного сдвига: в первом наблюдается сдвиг фоновой границы, так что внешний склон радиационного пояса удлиняется. Во втором типе регистрируются всплески повышенной интенсивности электронов, которые, как правило, накладываются на общий сдвиг склона пояса первого типа. На рисунке 2 приведены широтные профили электронов 0.3 МэВ, измеренные спутником К-Ф 18.01.2004 г. Средний Kp -индекс за сутки равнялся трем (суммарный $Kp = 25$). Магнитной бури не было, минимальная величина Dst равнялась -33 нТл. В утренних пролетах виден сдвиг к полюсу фоновой границы до $L = 15$, тогда как в вечернем секторе радиационный пояс сохранял профиль невозмущенного дня. Эти две особенности — сдвиг к полюсу в возмущенные периоды и асимметрия утро–вечер, наблюдаются во многих случаях.

Положение максимума и фоновой границы радиационного пояса задается структурой магнитного поля ночной магнитосферы, следовательно, изменение положения широтного про-



филя радиационного пояса во время суббури указывает на изменения структуры магнитного поля. Ниже мы приведем несколько примеров одновре-

Рис. 1. Примеры измерения радиальных профилей электронов, за несколько часов спокойной магнитной обстановки на спутниках К-Ф (а), S-1 (б) и POES-15 (в). Приведены все измерения без отбора, по четыре профиля за каждый облет Земли, как в северном, так и в южном полушарии на восходящих и нисходящих орбитах. Ромбики – утренний сектор (00–12 LT), крестики – вечерний сектор (12–24 LT)

менного сдвига в полярных шапку пояса энергичных электронов и суббуревой активности.

22.01.2004 г. В этот день наблюдалась магнитная буря с амплитудой –150 нТл. Внезапное начало (SC) было зарегистрировано в 01.37 UT, но главная фаза началась только через 10 часов, а в более ранние часы, когда проводились обсуждаемые ниже измерения, суббура проходила на фоне положительных величин Dst . На рисунке 3а приведены три магнитограммы из меридиональной цепочки CANOPUS. Суббура началась в авроральной зоне и через 10 мин переместилась в высокие широты. Интересно, что две близкие высокоширотные магнитные станции CONT и RANK показывают значительное расхождение в амплитудах отрицательной бухты. Возможно, играет роль тот факт, что CONT и RANK, хотя и находятся на одной исправленной геомагнитной широте 73.5° , но CONT располагается на 3° севернее по географической и на 2° – по геомагнитной широте.

На рисунке 3б приведены три широтных профиля электронов 0.3 МэВ, измеренные на К-Ф, два в утреннем секторе (ромбики) и один – в вечернем (крестики). Времена пролета на $L = 10$ отмечены на рис. 3а. Первый утренний пролет проходил до начала суббури и не отличался от типичного широтного профиля спокойного дня. Точно такую же форму имел и вечерний профиль, который был измерен, когда активность была достаточно высокой. Второй утренний пролет, проходил через сорок мин после первого (в 02 UT) вблизи максимума в X -компоненте магнитного поля на полярной станции и зарегистрировал всплесковое возрастание и сдвиг фоновой границы пояса до $L = 13$.

05.05.2004 г. На рисунке 4 (а, б) представлен еще один пример высокоширотного сдвига радиационного пояса во время суббуревой активности. Обс. Соданкиля во время суббури находилась к западу от разрыва Харанга, поэтому на магнитограмме (рис. 4а) мы видим типичное положительное возрастание X -компоненты магнитного поля. Полюсная экспансия возмущения сопровождается сдвигом активности к западу (WTS, westward traveling surge), поэтому когда активность дошла до высокоширотной станции на Шпицбергене, в магнитном поле мы видим здесь отрицательную суббуревую бухту. Три радиальных профиля, один в вечернем и два в утреннем секторе показаны на рис. 4б, время пролета указаны на рис. 4а. В ве-

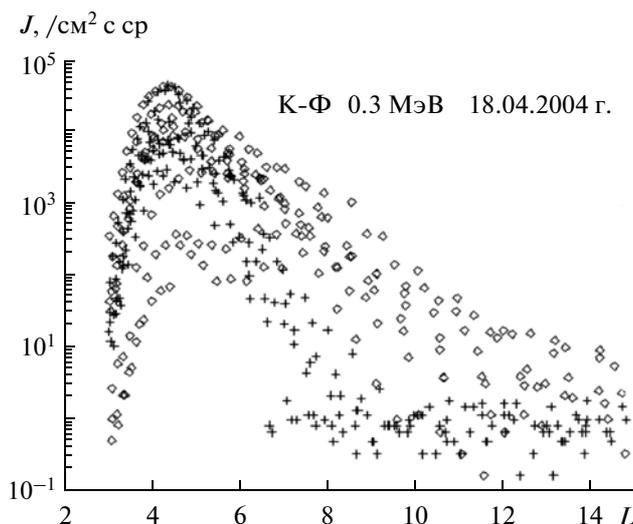


Рис. 2. То же, что на рис. 1а для интервала с повышенной суббуравой активностью.

черном пролете в самом начале суббури спутник S-1 измерил профиль спокойного дня, затем на активной фазе суббури два пролета в утренние часы показали возрастания потока электронов и сдвиг фоновой границы в высокие широты. Все последующие пролеты, в том числе и утренний в 19 UT (не показаны) измеряли профили спокойного типа, так что сдвиг и возрастание были достаточно кратковременны. Примерно посередине по времени между двумя возмущенными профилями на спутнике S-1, спутник К-Ф также измерил возмущенный профиль (не приводится).

31.03.2004 г. В этот день было несколько суббурь, мы обратим внимание на вторую из них, начавшуюся в авроральной зоне в 08.30 UT и в полярной шапке — со сдвигом в 10 мин. В 08.53 UT суббура полярной шапки достигла минимума в -450 нТл (рис. 5а). Первый вечерний пролет с широтным профилем спокойного типа проходил на фазе восстановления предыдущей суббури, второй вечерний — в конце активной фазы обсуждаемой суббури, и на этот раз внешний склон радиационного пояса был сдвинут в полярную шапку, так что эффект сдвига наблюдается иногда и в вечернем секторе. Оба пролета в утреннем секторе (рис. 5б) показали возрастание потока электронов, в первом, вблизи минимума суббуравой бухты оно наблюдалось от $L = 5$ до $L = 15$. Второй утренний пролет проходил на фазе восстановления суббури, интенсивность и сдвиг широтного профиля электронов были не столь значительны, но еще далеко не спокойного типа.

13.03.2004 г. Это была суббура, продолжительная и сильная, с амплитудой до -800 нТл в авроральной зоне и до -400 нТл в полярной шапке (рис. 6а). Измерения электронов на спутнике S-1 показали уникальный пример всплеска не только

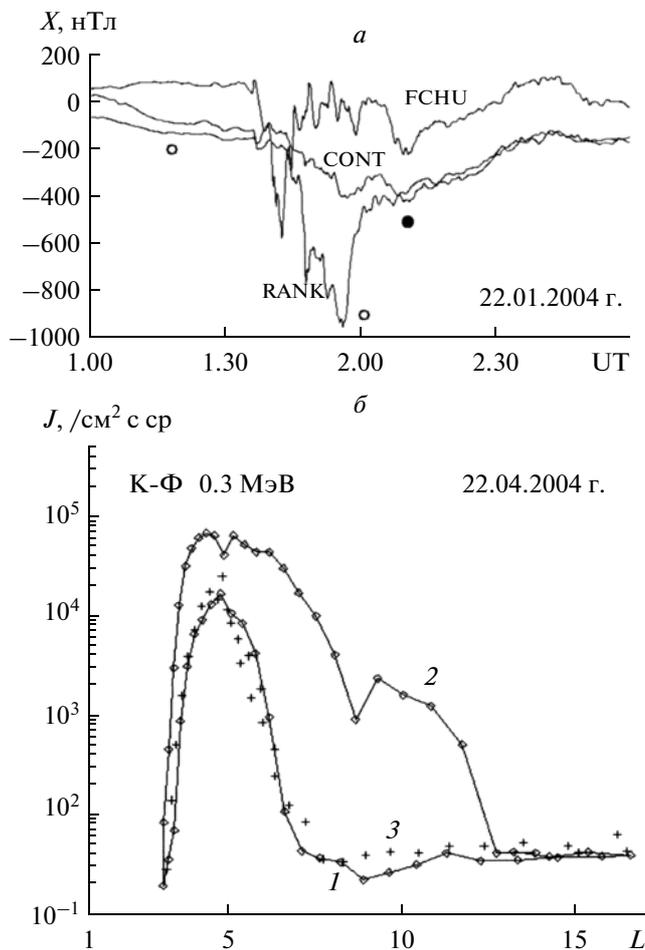


Рис. 3. (а) Бухтообразные возмущения магнитного поля (X -компонента) на трех канадских станциях 22.01.2004 г., времена пролетов К-Ф в утреннем и вечернем секторах показаны пустым и зачерненным кружками соответственно; (б) — три широтных профиля, времена пролетов на $L = 10$ обозначены как (1) — 01.17 UT, 08 LT, (2) — 02.01 UT, 11 LT, (3) — 02.10 UT, 20 LT.

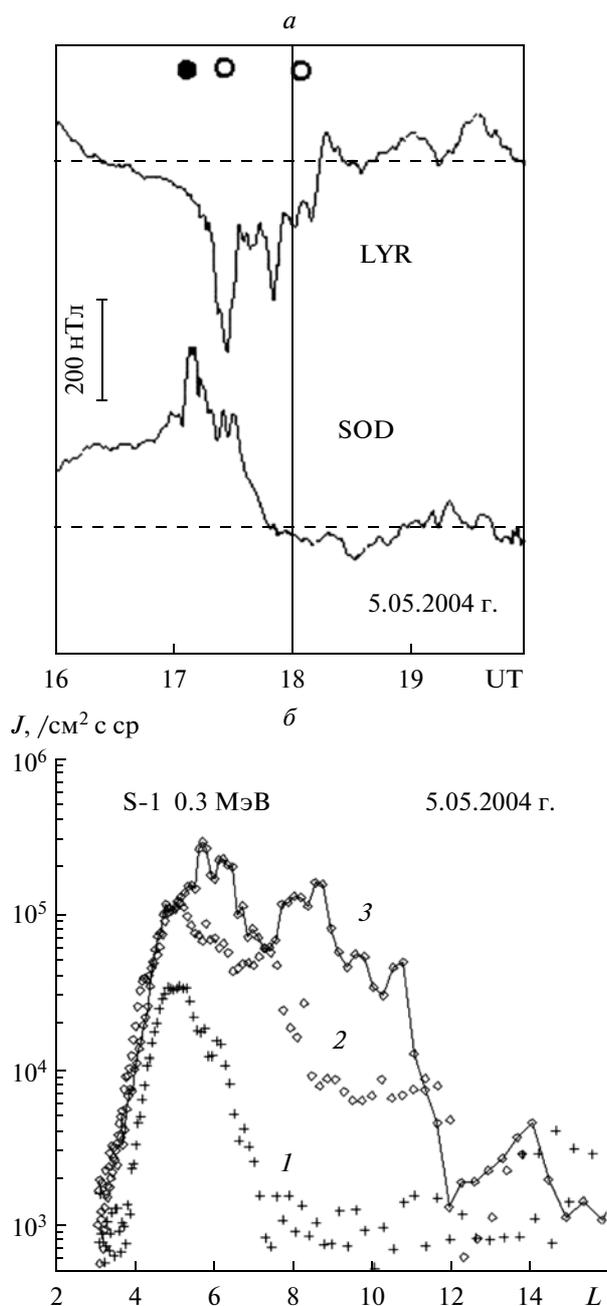


Рис. 4. (а) Магнитограммы двух станций скандинавской цепочки 5.05.2004; (б) — три широтных профиля спутника S-1: (1) 8 17.35 UT, 16 LT, (2) — 17.24 UT, 08 LT, (3) — 18.03 UT, 05 LT.

в канале 0.3 МэВ, но и в канале 1.7 МэВ (рис. 6б), причем в диапазоне широт L от 5 до 12 (на этом витке максимальная широта). Формально компьютерная программа отнесла этот виток к вечернему сектору, однако 22 LT — это время максимума начала суббури, так что электроны — это свежеускоренные, а не пришедшие сюда за счет магнитного дрейфа. А вот следующий профиль,

измеренный через 6 мин, когда спутник перелетел в вечерний сектор, не отличался от профиля спокойного типа.

2.3. Статистика. Для того чтобы оценить вероятность появления высокоширотных профилей, мы составили коллекцию графиков возрастных за первые 4 месяца 2004 года, зарегистрированных на спутнике S-1. (Во время работы спутника К-Ф были большие перебои в работе приемных пунктов телеметрии, и непрерывного ряда измерений не было). Критерий для выделения возрастных был выбран такой: на профилях должны были присутствовать возрастания интенсивности $\geq 10^4$ на $L \geq 10$. При этом отсекались возрастания с меньшей амплитудой, но и при таком жестком отборе за 4 месяца мы получили 60 возмущенных профилей. Среди них были случаи с достаточно гладким склоном спада, случаи всплесков и больше всего — смешанного типа.

Для анализа зависимости от магнитной активности мы использовали 3-х часовые Kp -индексы, сравнивая число возрастных при данной величине Kp с общим числом 3-х часовых интервалов с такой же величиной индекса. Результаты сравнения показаны в табл. 1. Так, случаи $Kp = 0-1$ регистрировались 224 раза, и профилей с возрастаниями электронов в таких условиях не наблюдалось. Случаи $Kp = 2$ регистрировались за 4 месяца 259 раз, из них только в шести случаях отмечено возрастание 0.3 МэВ-ных электронов.

Индексы $Kp = 3$ и выше указывали на то, что в этом интервале имела место суббури. Общее число интервалов в возмущенные периоды ($Kp 3-9$) составило 477, в спокойные ($Kp = 0-2$) — 483, т.е. примерно поровну. Радиальных профилей с высокоширотным возрастанием потока электронов в первом случае было 54 и во втором — всего 6 (все при $Kp = 2$). Таким образом, можно уверенно утверждать, что связь профилей с фоновой границей, уходящей в полярную шапку, с авроральной активностью несомненна.

2.4. Зависимость от местного времени. Асимметрия утро-вечер радиационного пояса, о которой мы говорили выше, прослеживается и в статистике долгого распределении всплесков. В утреннем секторе (0–12 LT) наблюдалось 40 возрастных потока электронов, в вечернем (12–24 LT) — 20, в два раза меньше.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Физика радиационных поясов и физика суббури — два раздела магнитосферной физики, которые не часто соприкасаются друг с другом. Вместе с тем, точки соприкосновения есть и весьма существенные. Электроны внешнего радиационного пояса располагаются на замкнутых квазидипольных силовых линиях, способных поддержать пол-

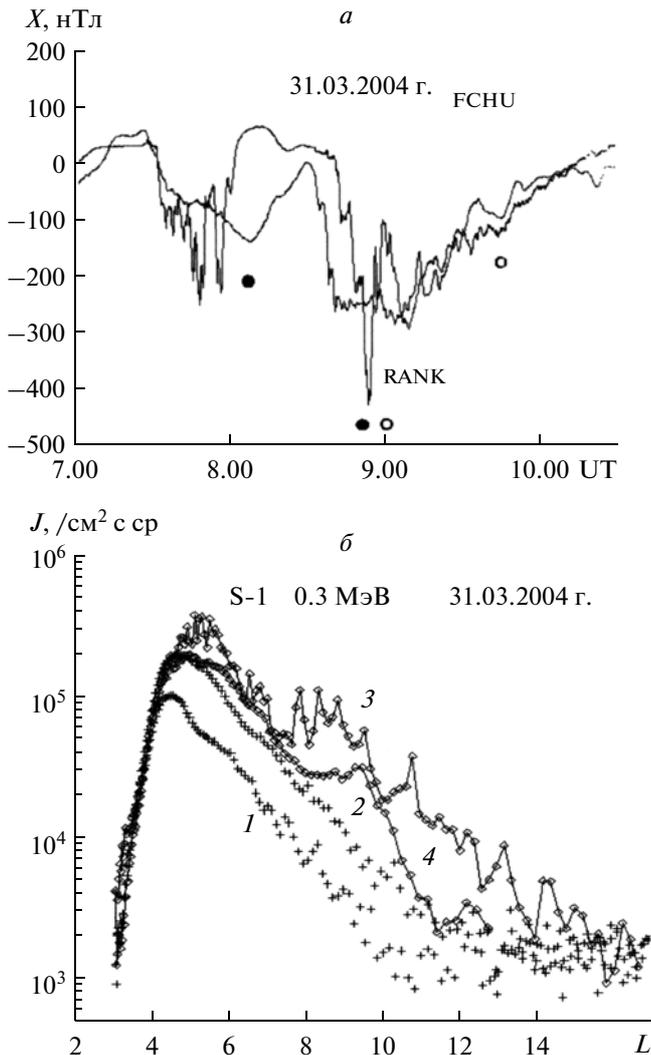


Рис. 5. Магнитограммы (а) и широтные профили (б), измеренные на S-1 31.03.2004 г. Времена пролетов: (1) – 08.09 UT, 19 LT, (2) – 08.50 UT, 15 LT, (3) – 09.00 UT, 07 LT, (4) – 09.46 UT, 01 LT.

ный магнитный дрейф вокруг Земли, кроме того части электронов на более удаленных от Земли орбитах удается завершить замкнутый дрейф благодаря диффузии на флангах. Таким образом, внешний электронный пояс делится на две области: устойчивого захвата и квазизахвата, последняя образует внешний склон радиационного пояса. Фоновая граница радиационного пояса и приполюсная граница овала полярных сияний совпадают, так что зона активных полярных сияний расположена с ночной стороны Земли на склоне радиационного пояса. Подробное рассмотрение вопросов геометрии магнитосферных зон не входит в наши планы, желающим предлагается ознакомиться с публикациями [Лазутин, 1989, 2004, 2007]. Вторая точка соприкосновения связана с тем, что во время активной фазы суббури генерируются не только низкоэнергичные электроны, вызывающие

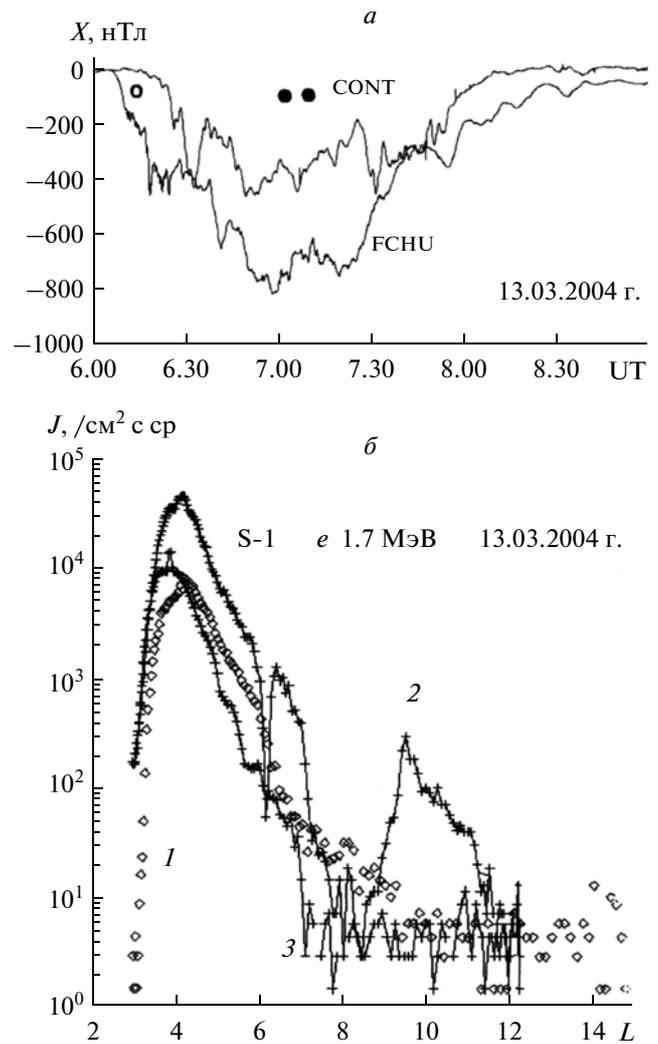


Рис. 6. Магнитограммы (а) и широтные профили (б) 13.03.2004 г. Времена пролетов (1) 06.14 UT, 08 LT, (2) – 07.04 UT, 22 LT, (3) – 07.10 UT, 19 LT.

активные формы полярных сияний, но и энергичные электроны от первых десятков кэВ до сотен кэВ и иногда до единиц МэВ, которые пополняют радиационный пояс.

Как известно, суббурия начинается в районе самой южной дуги сияния и по мере развития области активизаций смещаются к полюсу. Предполагается, что по окончании активной фазы суббури приполюсная граница полярных сияний на ночной стороне не выходит за пределы невозмущенной границы с полярной шапкой и вместе с ней конфигурация ночной магнитосферы возвращается к спокойному виду. Принятые представления о токовых системах суббури и принятые модели суббури не предполагают возможности выхода активизаций в полярную шапку.

Таблица 1. Общее число интервалов с Kp от 0 до 9 за 4 месяца 1.01.2004 г.–30.04.2004 г., и число событий с возрастанием электронов в полярной шапке при данном уровне активности

Kp	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Всего	54	170	259	248	169	43	15	2	0	0
Событий	0	0	6	9	28	11	6	0	0	0

Вместе с тем довольно часто активные формы полярных сияний наблюдаются внутри области полярной шапки или на ее границе, измеренной в отсутствии магнитных возмущений, причем в некоторых случаях возникает подозрение, что эти сияния близки по ряду признаков сияниям авроральной зоны, которая расширяется за пределы спокойной границы. Так, тип событий, наблюдавшихся в вечерне-полуночные часы, описанный Клейменовою и др. [2012], сопровождался бухтообразными магнитными возмущениями и пульсациями в диапазоне $Pi2$, правда, гораздо более продолжительными. Из существенных отличий от классических суббурь отметим, что возмущение возникает сразу в районе полюсной границы авроральной зоны, а не на южной дуге сияний, при этом в авроральной зоне активных сияний нет.

Существует еще особый, мало изученный, класс явлений, так называемые суббури полярной шапки (polar cap substorms) описанный в работах [Weatherwax et al., 1997, Doolittle et al., 1998, Mende et al., 1999]. Это события с основными признаками суббурь, но наблюдавшихся на широтах, традиционно относящихся к полярной шапке. Появлялись они после классических суббурь, как вторая фаза суббури, продолжение полярной экспансии.

По тому, что эти суббури сопровождалась риометрическим поглощением, можно было сделать вывод о том, что ускорялись и электроны с энергией в десятки кэВ.

В принципе энергичные электроны регистрировались в полярной шапке и, соответственно, в хвосте магнитосферы и раньше, см. обзор [Imhof et al., 1993]. Высказывались разные предположения, что эти кратковременные возрастания электронов есть следствие ускорения в хвосте магнитосферы, или они приходят туда из авроральной области, но достаточно обоснованного подтверждения той или иной гипотезы не было.

Прямая связь высокоширотных всплесков энергичных электронов с суббурями полярной шапки была обнаружена в работах [Kuznetsov et al., 2001, 2004], когда наряду с магнитными бухтами в полярной шапке и всплесками риометрического поглощения измерялись и возрастания энергичных электронов с энергией >0.3 МэВ на низковысотном спутнике с полярной орбитой КОРОНАС-И. Регистрация всплесков электронов во время активной фазы суббурь полярной шапки и сам факт суббурь полярной шапки могут быть объяснены

сдвигом фоновой границы и внешнего склона радиационного пояса в результате усиления напряженности магнитного поля, названного авторами эффектом гипердиполизации.

Главный результат настоящей работы указывает на тесную связь высокоширотных возрастаний энергичных электронов с суббурями, причем это проявляется как и при рассмотрении индивидуальных событий, так и в статистике. Статистический анализ показал, что, чем выше уровень суббуревой активности, тем выше вероятность сдвига фоновой границы электронного пояса и регистрации высокоширотных возрастаний электронов. Поскольку положение радиационного пояса отслеживает изменения структуры конфигурации магнитного поля Земли, можно утверждать, что во время суббурь происходит полюсная экспансия границ ночной зоны квазизахвата.

Если принять во внимание, что при анализе не учитывались случаи возрастаний с меньшей интенсивностью, можно предположить, что означенный эффект сдвига может иметь место в большом числе или даже во всех суббурях в менее заметном виде.

Анализ индивидуальных случаев, примеры которого были приведены выше, показывает, что высокоширотные всплески энергичных электронов могут генерироваться суббурями полярной шапки, аналогичным образом тому как это происходит в классических суббурях авроральной зоны. Последовательность сдвига начала магнитных бухт к высоким широтам, заметная на большинстве приведенных рисунков, подтверждает вывод о том, что суббури полярной шапки подготавливаются суббурями в авроральной зоне, что гипердиполизация возникает в процессе полярной экспансии авроральной активности.

При этом сам механизм расширения области квазизахвата в полярную шапку в ночном секторе (в хвост магнитосферы), остается неизвестным. Ясно, что для такого изменения конфигурации магнитосферы необходимо предположить, что суббуревая токовая система меняется по ходу развития полярной экспансии и существенно отличается от принятых токовых систем суббури. Акасофу [Akasofu, 2003, 2004] предположил, что таким дополнительным током может быть ток в авроральной магнитосфере, направленный с вечера на утро и предложил возможные механизмы формирования такого тока. Однако эксперимен-

Таблица 2. Координаты магнитных станций

Обсерватория	Код	GLat	Glon	GMlat	GMlon	L
Contwoyto	CONT	65.75	248.74	72.39	311.30	12.36
Fort Churchill	FCHU	58.76	265.91	66.27	336.68	8.18
Longyearbyen	LYR	78.20	15.82	75.12	113.00	15.8
Rankin Inter	RANK	62.82	267.89	70.37	338.92	12.44
Sodankylä	SOD	67.37	26.63	63.92	107.26	5.25

тальных подтверждений этих механизмов нет. Нет и отчетливого представления, почему гипердиполизация “избегает” дневного и вечернего секторов.

4. ВЫВОДЫ

Магнитосферные суббури меняют конфигурацию ночной магнитосферы таким образом, что область квазизахвата, фоновая граница внешнего радиационного пояса электронов и сама полюсная граница авроральной магнитосферы сдвигаются в сторону хвоста магнитосферы и в проекции на ионосферу – в область полярной шапки. В ряде случаев это приводит к развитию суббурь полярной шапки, в которых проявляются все основные черты классической суббури, включая и ускорение энергичных электронов. Причина усиления периферийного магнитного поля, названного эффектом гипердиполизации, заключается в появлении во время суббури особой токовой системы, источники которой и геометрия остаются неисследованными. Эффект гипердиполизации продолжается порядка часа, или больше, в зависимости от длительности суббурного возмущения и охватывает преимущественно полуночно-утренний сектор.

Автор благодарит сотрудников НИИЯФ, принявшим участие в создании спектрометра частиц спутника КОРОНАС-Ф и профессора Н. Хасебе из университета Васеда (Япония), предоставившего в наше распоряжение базу данных спутника SERVIS-1.

Сеть MIRACLE (табл. 2) появилась в результате международного сотрудничества при лидерстве Финского метеорологического института и включала сеть магнитометров IMAGE. Автор также благодарен И.Р. Манну, Д.К. Миллингу и другим лицам из команды CARISMA. Сеть управляется университетом Альберта и финансируется Канадским космическим Агентством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Любич А.А., Бурнаш Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббурного западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия Т. 48. № 3. С. 297–305. 2008.
- Клейменова Н.Г., Антонова Е.Е., Козырева О.В., Малышева Л.М., Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Волновая структура магнитных суббурь в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 85. № 6. С. 785–793. 2012.
- Лазутин Л.Л. Развитие суббури на замкнутых силовых линиях // Магнитосферные исследования. М.: МГК АН СССР. № 12. С. 34–52. 1989.
- Лазутин Л.Л. О структуре возмущенной магнитосферы // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 534–538. 2004.
- Лазутин Л.Л. Авроральная магнитосфера // Модель космоса. М.: МГУ, ред. М.И. Панасюк и Л.С. Новиков. Т. 1. С. 547–578. 2007.
- Старков Г.В., Фельдштейн Я.И. Изменение границ овальной зоны сияний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 7. С. 62–71. 1967.
- Akasofu S.-I. Several “controversial” issues on substorms // Space Sci. Rev. V. 113. P. 1–40. 2004.
- Akasofu S.-I. A source of auroral electrons and magnetospheric substorm current systems // J. Geophys. Res. V. 108. A4. P. 8006. doi:10.1029/2002JA009547. 2003.
- Anderson K.A., Harris H.K., Paoli R.J. Energetic electron fluxes in and beyond the earth’s outer geomagnetic field // J. Geophys. Res. V. 70. P. 1039–1050. 1965.
- Doolittle J.H., Mende S.B., Frey H.U. et al. Substorm auroral expansion to high latitudes and the dawn/dusk flanks // Substorm-4, March 9–13, 1998, Lake Hamana, Japan. ed. S. Kokubun and Y. Kamide, Terra Publ. Tokyo. P. 47–50. 1998.
- Gussenhoven M.S. Extremely high latitude auroras // J. Geophys. Res. V. 87. P. 2401–2412. 1982.
- Hones E.W. The poleward leap of the auroral electrojet as seen in auroral images // J. Geophys. Res. V. 90. P. 5333–5337. 1985.
- Imhof W.L., Robinson R.M., Nightingale R.W., Gaines E.E., Vondrak R.R. The outer boundary of the Earth’s electron radiation belt: Dependence upon L, energy, and equatorial pitch angle // J. Geophys. Res. V. 98. A4. P. 5925–5934. 1993.
- Kodaira S., Asaeda M., Fujii M., Hareyama M., Hasebe N., Kajiwara N., Sakurai K., Akiyama M., Ichiji K., Hama K. Space and Time Correlations of Particle Fluxes after Giant Flares in Radiation Belts Observed by Two Satellites, USERS and SERVIS-1 // Proc. 29th Intern. Cosmic Ray Conf. Pune, India, August 3–10, 2005. P. 101–104. 2005.
- Kuznetsov S., Lazutin L.L., Rosenberg T., Borovkov L., Gotselyuk Yu., Weatherwax A. Energetic electron and ion dynamics and polar aurora during magnetospher-

- ic substorm of March 10, 1994 // Substorm-5, St. Petersburg, Russia, 16–20 May 2000, ed. Wilson A. ESA SP-443. P. 511–514. 2001.
- *Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Yu.V.* CORONAS-F satellite – tasks for study of particle acceleration // *Adv. Space. Res.* V. 30. P. 1857–1861. 2002.
 - *Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Weatherwax A.T., Rosenberg T.J.* Precipitation of 0.5 MeV electrons and substorm expansion into the polar cap // *Proc. 7th Intern. Conf. on substorms*, Levi, Finland, March 22–26, 2004. ed. N. Ganushkina and T. Pulkkinen, FMI, Helsinki. P. 172–176. 2004.
 - *Lazutin, L., Korth A.* Distribution of energetic particle “injections” events along the radiation belt slope // *Substorms-4*, March 9–13, 1998, Lake Hamana, Japan. ed. S. Kokubun and Y. Kamide, Terra Publ. Tokio. P. 817–820, 1998.
 - *Loomer E.L., Gupta J.C.* Some characteristics of high-latitude substorms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 42. P. 645–652. 1980.
 - *Mann I.R., Milling D.K., Rae I.J. et al.* The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 413–451. doi:10.1007/s11214-008-9457-6. 2008.
 - *McDiarmid I.B., Burrows J.R.* Electron fluxes at 1000 kilometers associated with the tail of the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 3031–3044. 1965.
 - *Mende S.B., Frey H.U., Geller S.P., Doolittle J.H.* Multi-station observations of auroras: Polar cap substorms // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 2333–2342. 1999.
 - *Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Y.I., Meng C.-I.* The morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res.* V. 101(A5). P. 10.737–10.748. 1996.
 - *Nielsen E., Bamber J., Chen Z.-S., Brekke A., Egeland A., Murphree J.S., Venkatesan D., Axford W.I.* Substorms in the polar cap // *Ann. Geophys.* V. 6 (5). P. 559–572. 1988.
 - *Rodger C.J., Clilverd M.A., Green J.C., Lam M.M.* Use of POES SEM-2 observations to examine radiation belt dynamics and energetic electron precipitation into the atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 115. A04202. doi:10.1029/2008JA014023. 2010.
 - *Viljanen A., Hakkinen L.* IMAGE magnetometer network // *Satellite-Ground Based Coordination Sourcebook* (eds. M. Lockwood, M.N. Wild and H.J. Opgenoorth). ESA publications SP-1198 P. 111–117. 1997.
 - *Weatherwax A.T., Rosenberg T.J., MacLennan C.G., Doolittle J.H.* Substorm precipitation in the polar cap and associated Pc5 modulation // *Geophys. Res. Lett.* V. 24 (5). P. 579–582. 1997.