

УДК 550.385.36

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БРЕЙКАПА РАЗВИТОЙ СУББУРИ И ПСЕВДОБРЕЙКАПА

© 2008 г. Л. Л. Лазутин<sup>1</sup>, Т. В. Козелова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета, Москва

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Мурманск

e-mail: ll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 28.08.2007 г.

После доработки 28.01.2008 г.

Проводится сравнение псевдобрейкапа и суббурового брейкапа по двум случаям, в которых эти два события следовали один за другим с интервалом около часа. Привлекались как наземные измерения, так и данные спутниковых детекторов заряженных частиц. Показано, что особенность псевдобрейкапов заключается в слабой интенсивности авроральной активизации и вызвавшего ее продольного потока низкоэнергичных электронов. Кроме того, поток ускоренных во время псевдобрейкапа энергичных ионов и их энергия малы по сравнению с этими показателями начала суббури и поэтому малоэффективны в создании условий для развития последующей активизации. В то же время поток энергичных электронов велик и степень диполизации велика, что приводит к значительному расходу накопленной в этом секторе энергии.

PACS: 94.30.Lg

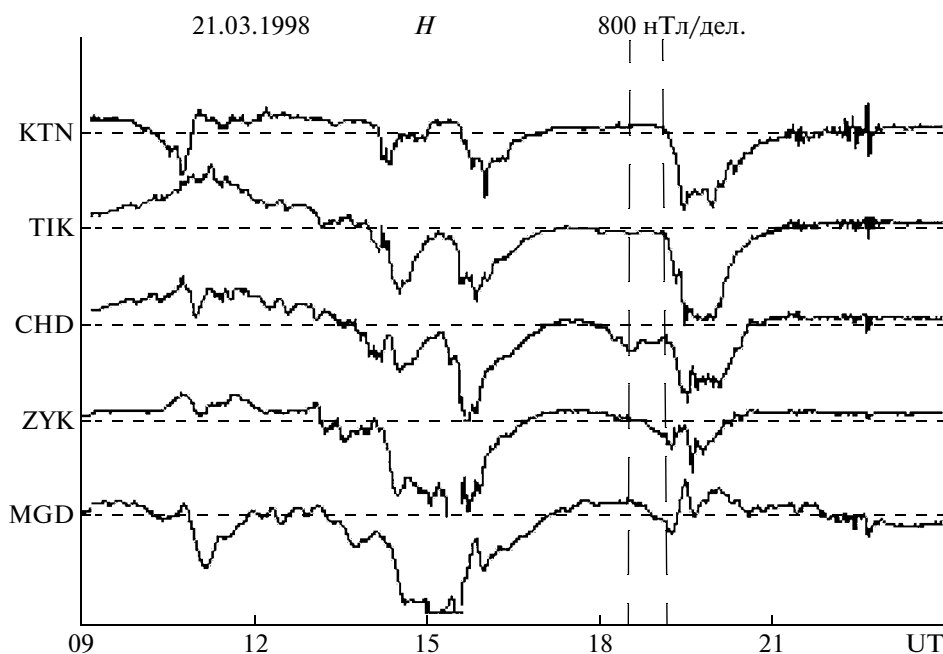
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Псевдобрейкапы (ПБ) были выделены Akasofu [1964] как слабые суббури, начинающиеся на более высокоширотной, чем экваториальная, дуге полярных сияний. Davis and Hallinan [1976] отнесли ПБ к разряду слабых локализованных суббурь. Последующие работы, в основном, поддерживали эту точку зрения. Вместе с тем, эти и другие авторы находят и сходство псевдобрейкапа с брейкапом развитой суббури по многим основным признакам. McPherron [1991] отметил, что псевдобрейкап, как и брейкап, сопровождается цугом пульсаций  $Pi2$ . Диполизацию магнитного поля и инжекцию частиц на  $\sim 6.6 R_E$  во время ПБ обнаружили Nakamura et al. (1994). В работе [Koskinen et al. 1993] во время ПБ было найдено, наряду с очень слабым западного электроджетом в ионосфере, возрастание перпендикулярных потоков электронов с энергиями 61–695 кэВ вблизи экваториальной плоскости магнитосферы на  $\sim 8.7 R_E$ . Эти авторы отметили, что рассмотренный ими ПБ происходил во время подготовительной фазы суббури. Кроме того, низкая проводимость ионосферы также могла быть одной из причин ограниченного развития возмущения.

Таким образом, мнение многих авторов склоняется к тому, что ПБ — это слабая суббурия и главное отличие ПБ от брейкапа суббури заключается в том, что после псевдобрейкапа не происходит расширения возмущенной области, развития возмущения, которое быстро затухает.

Необходимо отметить, что Kamide [1998] не считает ПБ слабой суббурей. Слабая суббурия, по его мнению, слаба оттого, что перед этим на подготовительной фазе не накопилось достаточно энергии (в частности, в виде отклонения от устойчивой конфигурации магнитосферы), а у ПБ энергии достаточно, но есть неизвестный механизм, который подавляет дальнейшее развитие возмущения. Таким образом, под одним термином может скрываться два типа возмущений — слабые суббури, одиночные активизации полярных сияний, которые в ряде работ принимаются за псевдобрейкапы и, с другой стороны - псевдобрейкапы — особое явление в определении Kamide [1998].

В данной работе анализируются события именно второго типа. Будут рассмотрены особенности отличия ПБ от сопоставимой части развитой суббури. Очевидно, ПБ можно сравнивать с брейкапом, с началом суббури, во время которого происходит переход от подготовительной к активной фазе суббури. Это совокупность нескольких элементарных событий, локализованных, коротких (длительностью в  $\sim 1-2$  минуты) активизаций. Цепочка таких активизаций складывается и составляет фазу экспансии суббури. Ясно, что ПБ — явление более элементарное, чем брейкап. Видимо, иногда одиночная достаточно сильная активизация оказывается неспособной возбудить следующую активизацию и начать экспансию; такие события и относятся к классу псевдобрейкапов. В качестве условий, препятствующих расшире-



**Рис. 1.** Магнитограммы наземных станций 21.03.1998 г. Сверху вниз: Котельный (KTN, 69.9°, 201.0°), Тикси (ТИК, 65.6°, 196.9°), Чокурдах (CHD, 64.7°, 212.2°), Зырянка (ZYK, 59.6°, 216.8°), Магадан (MGD, 53.5°, 218.7°), координаты геомагнитные.

нию возмущения к полюсу (в хвост) можно назвать следующие:

а) — перед ПБ на подготовительной фазе не накопилось достаточно энергии [Kamide, 1998];

б) — продолжающаяся подготовительная фаза суббури (продолжающаяся или усиливающая крупномасштабная конвекция) подавляет экспансию;

в) — условия для роста взрывной неустойчивости могут выполняться локально в одном месте, но не в большом масштабе, тогда развитие неустойчивости будет остановлено;

г) — низкая проводимость ионосферы и слабые продольные токи [Koskinen et al., 1993; Aikio et al., 1999]. Нарастающая взрывная неустойчивость может быть погашена, если ионосферно-магнитосферная система не может связаться продольными токами, чтобы сформировать суббуревой токовый клин [Maynard et al., 1996; Pulkkinen, 1996; Erickson et al., 2000].

Дополнительным аргументом в пользу роли внешних условий (а–б) служат наблюдения того, что фаза экспансии достаточно большого числа суббурь инициируется уменьшением крупномасштабной конвекции (сменой знака  $B_z$ ) [Lyons et al., 2003]. Исследования магнитосферных суббурь по данным спутника CRRES позволило дополнить известный ряд традиционных проявлений брейкапа новыми признаками. В частности, в ряде работ было выявлено разделение эффекта инжекции энергичных частиц на электронные и

ионные возрастания, имеющие, по всей видимости, разную природу [Козелова и др. 1998; Lazutin et al., 2002, Лазутин и Козелова, 2004]. Кроме того, комплексный анализ суббуревой активности по данным наземной сети и изменениям частиц на спутнике CRRES позволил сделать вывод о том, что возрастание энергичных ионов, опережающее диполяризацию магнитного поля, связано с появлением потоков низкоэнергичных электронов с анизотропией вдоль силовых линий магнитного поля и может играть ключевую роль в развитии неустойчивости брейкапа, [Лазутин и др., 2007а,б]. Опираясь на эти дополнения к общей картине развития брейкапа, мы рассмотрим в данной работе два примера ПБ, первый по магнитным данным и полярным сияниям, второй — с анализом измерений потоков заряженных частиц.

## 2 ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ И ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ

### 2.1 Суббуревая активность 21 марта 1998 г.

Событие 21.03.1998 анализировалась ранее в работе [Lazutin et al., 2001], где основной упор был сделан на динамике суббури. Там отмечалось наличие псевдобрейкапа за 40 мин до начала суббури (18.35 UT), но анализ псевдобрейкапа не проводился. На рис. 1 приведены измерения  $H$ -компоненты магнитного поля на нескольких наземных станциях авроральной зоны. Суббурия началась в 19:15 UT и проявилась на всех станциях, тогда как

ПБ виден как слабый локальный эффект в магнитном поле лишь на магнитограмме станции Чокурдах якутской цепочки. Приведенные на рис. 2 снимки полярных сияний на спутнике POLAR свидетельствуют об отклике на ПБ в виде слабого локального уярчения дуги сияний, слабom и локализованном по сравнению с мощным свечением и экспансией в последующей суббуре. Вместе с тем эта слабая локальная активизация, едва заметная в  $AE$  индексе, сопровождается мощным эффектом диполизации в магнитосфере на  $6.6 R_E$ , о которой можно судить по поведению энергичных частиц. На рис. 3 приведены измерения потоков авроральных протонов и электронов на двух спутниках LANL. Эти спутники были расположены на меридианах  $103.5^\circ E$  (LANL084) и  $69.8^\circ E$  (LANL97a). Перед ПБ на обоих спутниках виден дропаут – спад интенсивности частиц, свидетельствующий о смещении дрейфовых оболочек, вызванном типичном для подготовительной фазы суббури вытягиванием магнитных силовых линий в хвост магнитосферы. Вход спутника в дропаут является одним из главных признаков подготовительной фазы суббури [Sauvaud and Winckler, 1980; Onsager et al., 2002]. За несколько минут до ПБ этот спад интенсивности частиц ускоряется, что часто наблюдается перед брейккапом суббури, при так называемом эффекте взрывной подготовительной фазы [Ohtani et al., 1992].

ПБ проявляется быстрым выходом из дропаута, восстановлением потока частиц, но лишь на одном спутнике, расположенном в восточном секторе вблизи местной полуночи, там, где отмечен ПБ по наземным магнитным данным и полярному сиянию. Вслед за этим в этом локальном секторе авроральной зоны подготовительная фаза возобновляется как бы с нуля. Второй спутник, расположенный западнее, на ПБ реагирует слабо, и из дропаута не выходит. Западный край ПБ лишь частично затрагивает меридиан второго ИСЗ. С началом суббури наблюдается другая картина – восстановление и ускорение энергичных частиц регистрируется на обоих спутниках LANL, что соответствует картине авроральной активности в широком долготном секторе, показанной на нижнем снимке спутника POLAR на рис. 2.

Результаты анализа данного псевдобрейкапа позволяют утверждать, что наряду с признаками слабой суббуровой активизации (локализация по долготе, слабый отклик в ионосфере, отсутствие экспансии) наблюдаются существенные особенности – глубокий дропаут перед ПБ и быстрая локальная диполизация, выход из дропаута с возвратом к спокойному состоянию в данном секторе магнитосферы.

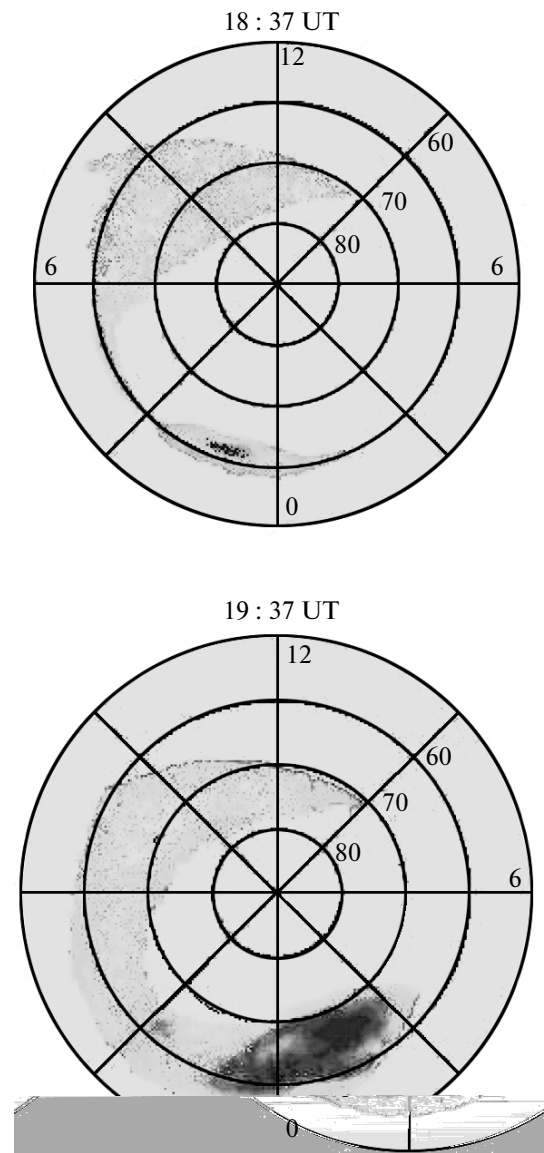
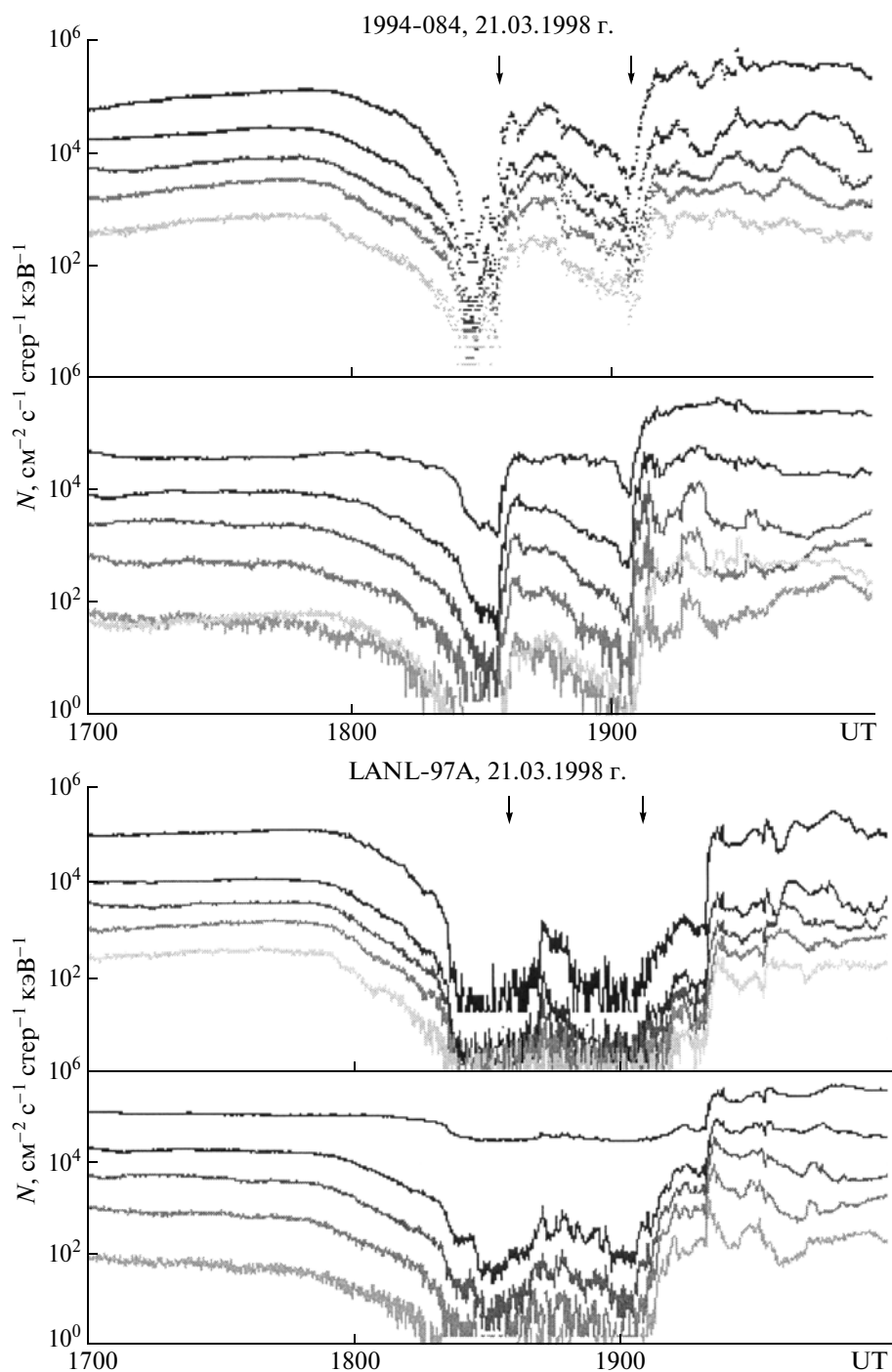


Рис. 2. Два снимка полярного сияния со спутника POLAR 21.03.1998 г. в координатах магнитной широты и местного магнитного времени (MLat, MLT). Сверху – в 18:37 UT, во время ПБ, снизу – в 19:18 UT, в разгар суббуровой экспансии. Шкала интенсивностей условная, серый тон примерно на два порядка меньше черного.

## 2.2. Псевдобрейкап и суббура 24 января 1991 г.

Еще одно сравнение псевдобрейкапа с полноценным брейккапом мы проведем по измерениям наземных обсерваторий и спутника CRRES 24 января 1991 г. в 16:00–16:20 UT и 16:57–17:10 UT соответственно, когда эти два явления наблюдались с промежутком менее часа. Блок детекторов спутника LEPA измерял потоки низкоэнергичных электронов и ионов от 50–100 эВ до 20 кэВ [Hardy et al., 1993]. Блок EPAS работал в энергетическом



**Рис. 3.** Поток электронов (сверху) и протонов (снизу) на спутниках LANL 1994-084 LANL-97A. Энергии электронов сверху вниз (кэВ): 50–75, 75–105, 105–150, 150–225, 225–315, протонов (кэВ): 50–75, 75–113, 113–170, 170–250, 250–400.

диапазоне от первых десятков до сотен кэВ [Korth et al., 1992].

Основная суббуря с брейкпапом 16:54 UT уже анализировалась в работе [Kozelova et al., 2002], но с другими целями. Привлечение измерений частиц в области низких энергий создает новые

возможности. Для анализа рассматривалось также поведение энергичных частиц на геостационарном спутнике LANL-129 на долготе 70°. Спутник CRRES находился на долготе 100°, но ближе к Земле, чем спутник LANL. Отсутствие дисперсии по энергиям в возрастаниях потоков электронов и ионов свидетельствует о том, что на этом

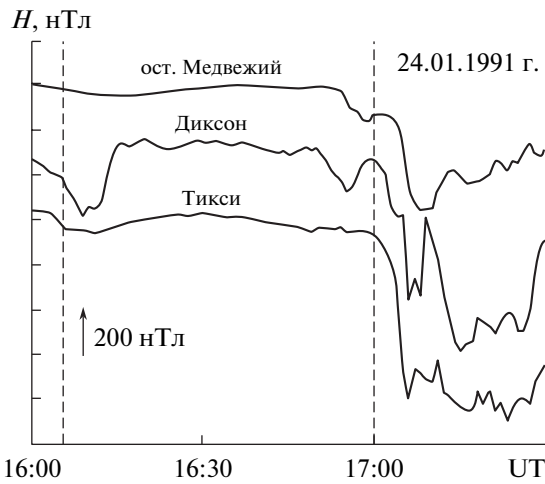


Рис. 4. Магнитограммы авроральных станций 24 января 1991 г. о. Медвежий (71.56°, 108.1°), Диксон (73.5°, 80.6°) и Тикси (65.6°, 196.9°).

меридиане и находился эпицентр возмущения. Обсерватория Диксон расположена в том же долготном секторе (80°).

На рис. 4 приведены записи H-компонент нескольких магнитных станций авроральной зоны. На рисунке хорошо заметно отличие двух явлений — брейкап начинает длительное возмущение в широкой долготной области с полярной экспансией, тогда как псевдобрейкап регистрируется только в виде короткой бухты в ограниченном локальном секторе в районе Диксона. По данным IMP-8,  $B_z$ -компонента ММП с 14:10 UT и до 16:40 UT была отрицательной (от 16:40 до 18:30 UT нет данных). Следовательно, псевдобрейкапу предшествовала достаточно развитая подготовительная фаза, которая, однако, продолжалась и после него. Магнитная бухта, связанная с ПБ, началась в 16:05 UT, и после максимума в 16:10 UT бухта резко затухла.

Возмущение, связанное с брейкапом, развивалось в несколько этапов. Первая интенсификация наблюдалась в интервале 16:53–16:56 UT. Второй интенсификации с началом в 17:00 UT соответствует большая амплитуда магнитной бухты на магнитограммах нескольких станций и такое же, как в первой, возрастание потока энергичных частиц.

**Наблюдения на геостационаре.** По данным спутника LANL 24 января 1991 г картина вариаций потоков энергичных частиц во время псевдобрейкапа почти полностью аналогична той, что показана на рис. 3: быстрый глубокий дропаут, который начинался примерно за 10 мин до начала взрывного процесса, с последующими диполизациями и инъекцией энергичных частиц. К сожалению, цифровых данных этого спутника не сохранилось, рис. 5 взят из сайта предварительного

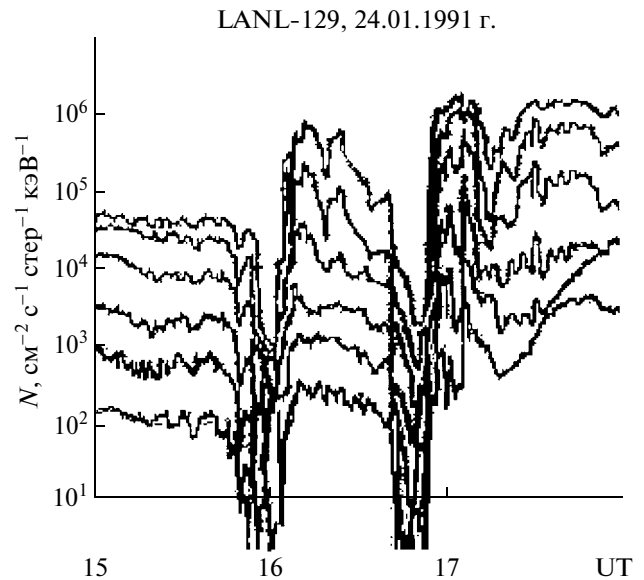


Рис. 5. Потоки электронов на спутнике LANL-129. Энергии электронов сверху вниз (кэВ): 30–45, 45–65, 65–95, 95–140, 140–200, 200–300.

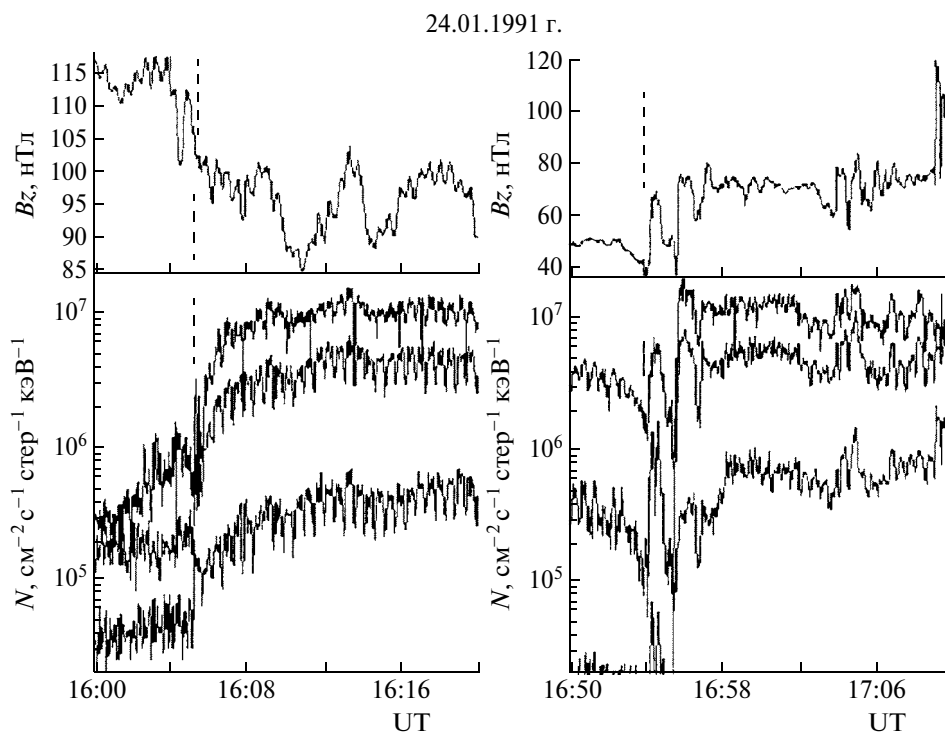
просмотра данных, но хотя детальные структуры не видны, временной ход диполизации согласуется с развитием ПБ по наземным данным. Восстановление потоков электронов из дропаута началось около 16:02 UT, и закончилось в ~16:10 UT, что совпадает с максимумом бухты магнитометра ст. Диксон. Брейкап основной суббури развивался по классической схеме с дропаутом и выходом из него в те же периоды, что дают наземные измерения, примерно в ~16:52–16:55 UT, после чего наблюдалось несколько пиков возрастаний. Далее мы подробно рассмотрим динамику энергичных и низкоэнергичных электронов и ионов и магнитного поля по данным CRRES.

### 2.3. Измерения энергичных электронов

Энергичные электроны чутко реагируют на изменения магнитного поля в авроральной области магнитосферы и поэтому служат хорошим индикатором динамики структуры суббури. На рис. 6 представлен временные вариации интенсивности энергичных электронов и магнитного поля по данным спутника CRRES во время ПБ (слева) и первых минут суббури (справа), когда спутник располагался на  $L \sim 5.4$  и  $L \sim 6.2$  соответственно.

Возрастания электронов с энергией  $> 20$  кэВ в 16 и 17 UT сравнимы по интенсивности, но существенно различаются по структуре.

**Суббурия** развивалась как сложное возмущение с каскадом активизаций и большим числом всплесков частиц, причем активизации связаны со ступенями диполяризации магнитного поля. После первого всплеска электронов и первой сту-



**Рис. 6.** Вариации  $B_z$ -компоненты магнитного поля и потоков энергичных электронов на спутнике CRRES во время псевдобрейкапа и начала суббури 24.01.1991 г. Сверху вниз: энергетические каналы 20–30, 30–40, 50–60 кэВ.

пени диполяризации силовые линии вновь вытягиваются в хвост, еще продолжается крупномасштабная подготовительная фаза, которая тормозит экспансию. Однако последующие всплески частиц и поля в целом привели к более крупномасштабной инжекции и диполяризации.

**Псевдобрейкап** в энергичных электронах на CRRES не имеет такой сложной структуры, здесь она более сглаженная, только одна ступенька возрастания в 16:06–16:08 UT, которое, однако, по интенсивности не уступает возрастанию во время брейкапа. На характер изменения магнитного поля влияет тот факт, что во время ПБ спутник еще был достаточно глубоко ( $L \sim 5.4$ ) и только выходил из области квазидипольных силовых линий. Это приводит к наблюдаемому вытягиванию магнитных силовых линий, которое усиливается изменением конфигурации магнитосферы на подготовительной фазе. Результирующий спад напряженности магнитного поля (уменьшение  $B_z$ ) прерывается на короткое время ПБ в 16:06–16:09 UT и затем продолжается.

#### 2.4. Измерения энергичных ионов

Временной ход потоков энергичных ионов, измеренных на спутнике CRRES, приведен на рис. 7. В отличие от электронов, возрастания ионов во время брейкапа и псевдобрейкапа различны не только по структуре, но по интенсивно-

сти и энергии. Во время псевдобрейкапа возрастание потоков ионов слабее и затрагивает только два–три наиболее низкоэнергичных канала, не выше 70–80 кэВ, тогда как уже в самую раннюю интенсификацию в начале суббури (16:53 UT) наблюдается возрастание потоков ионов с энергиями от 54 до 254 кэВ, а во второй интенсификации и до 600 кэВ. Такое же различие энергетических спектров ионов наблюдалось и на геостационаре LANL 1984-129 (рисунок не приводится), так что разница в положении CRRESa во время ПБ и брейкапа на этот эффект не влияет.

#### 2.5. Низкоэнергичные электроны и ионы

На рис. 8 приведены результаты измерения потоков низкоэнергичных частиц прибором MEPA спутника CRRES. Из большого числа энергетических каналов были выбраны каналы электронов и ионов с типичной для плазменного слоя энергией порядка 1 кэВ и для сравнения канал 20 кэВ, оба с 1 минутным усреднением. В верхних блоках потоки электронов в нижних — ионов. Слева показаны потоки захваченных частиц, слева — потоки вдоль силовых линий.

В ионных каналах прежде всего обращает на себя внимание различие интенсивности вдоль и поперек магнитных силовых линий, поток захваченных ионов на порядок выше, что соответствует нашим представлениям о структуре плазмен-

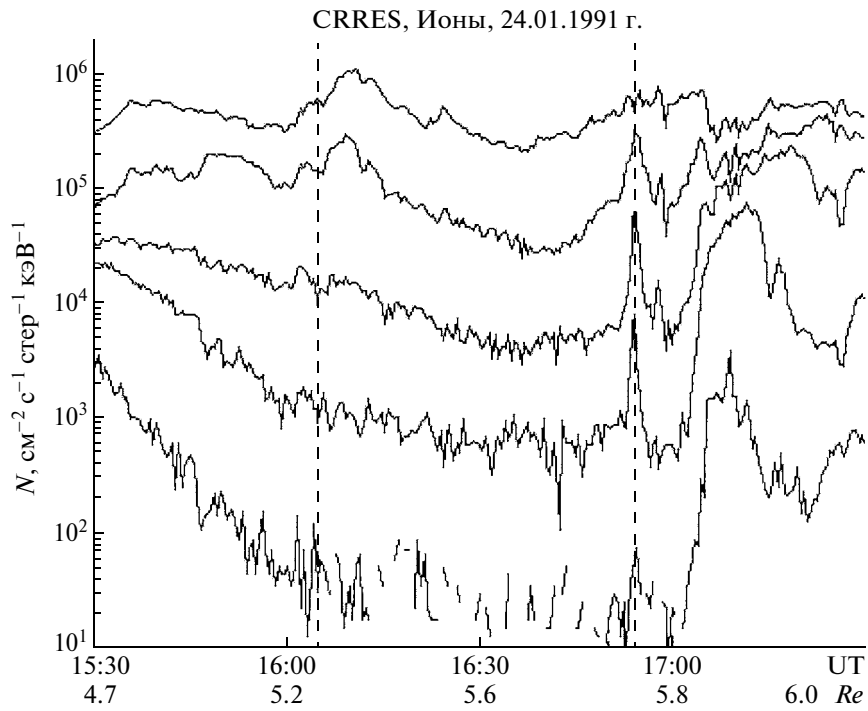


Рис. 7. Измерения энергичных протонов (ионов) на спутнике CRRES 24.01.1991 г. Сверху вниз, энергия, кэВ: 37–54, 54–69, 85–113, 147–193, 254–335. По горизонтальной оси время, (UT) и расстояние спутника от центра Земли.

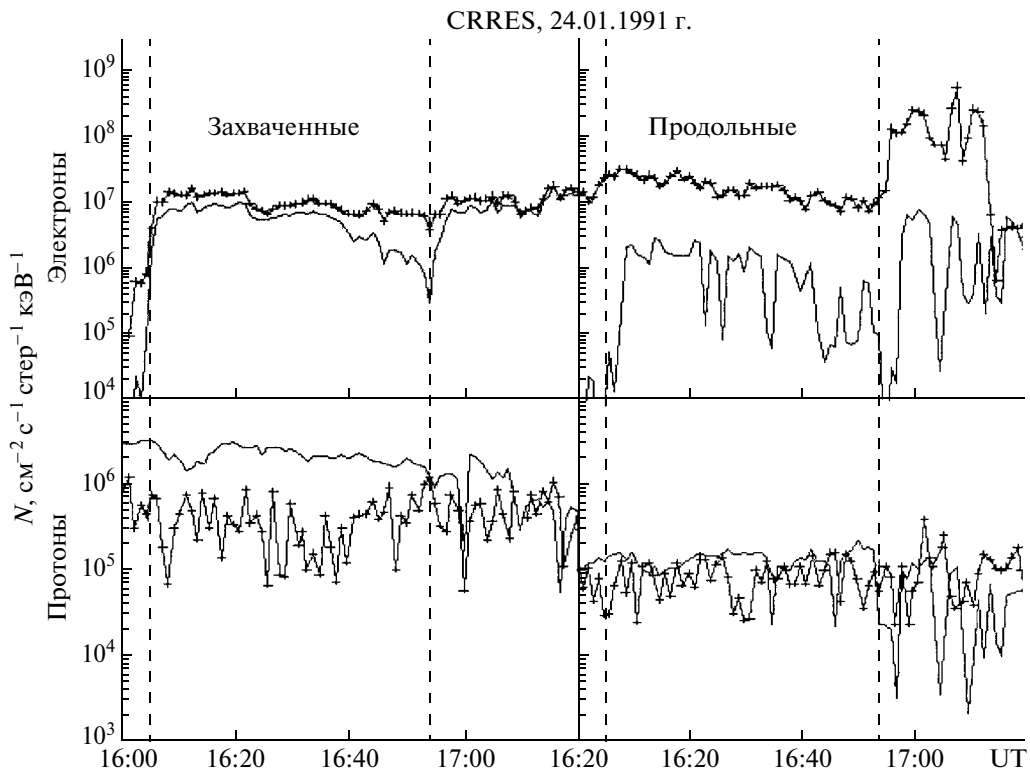
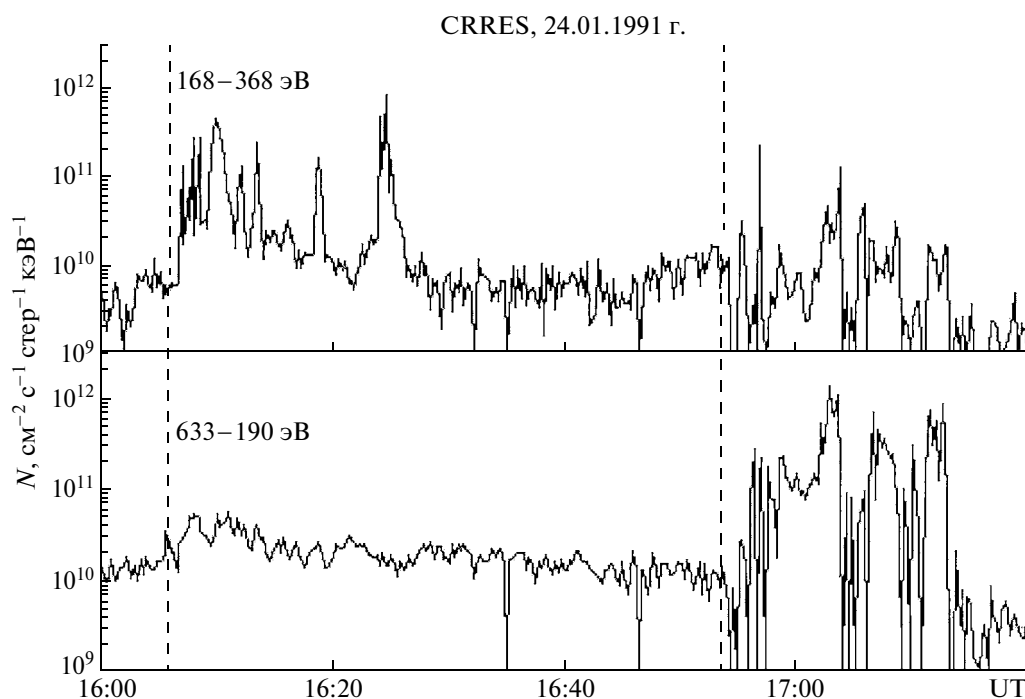


Рис. 8. Вариации захваченных (слева) и продольных (справа) потоков низкоэнергичных частиц с энергией 1 кэВ (крестики) и 20 кэВ (сплошная линия) на спутнике CRRES: во время псевдобрейкапа и брейкапа суббури. Верхние блоки – электроны, нижние – ионы (протоны).



**Рис. 9.** Потоки электронов вдоль магнитных силовых линий в двух энергетических диапазонах, измеренные на спутнике CRRES, 24.01.1991 г.

ного слоя. Потоки низкоэнергичных ионов имеют большой разброс, при разрешении 15 с — до трех порядков (не показано). Реакция на ПБ и брейкап в обоих каналах практически незаметна, что резко контрастирует с поведением ионов более высоких энергий. Динамика электронов с энергией 20 кэВ близка к динамике энергичных электронов (рис. 6), с такой же реакцией на начало возмущения. Электроны с энергией 1 кэВ изотропны, что свидетельствует об активном магнито-сферно-ионосферном взаимодействии. При этом поток захваченных частиц (с питч-углом  $90^\circ$ ) меняется мало, тогда как в потоке электронов вдоль силовых линий видны возрастания в начале брейкапа и менее заметные — в начале псевдобрейкапа.

Так как ускоренные потоки электронов вдоль магнитных силовых линий во время брейкапа ассоциируются с образованием токового клина суббури, одним из важнейших ее элементов, на этом эффекте стоит остановиться более подробно. Анализ измерений электронов многоканальным детектором LEPA показал, что во время псевдобрейкапа продольный поток электронов был слабее, а главное, энергия электронов не превышала 400 эВ, тогда как во время брейкапа и суббулевой экспансии продольные потоки имели максимум в диапазоне 600–1000 эВ. Эти особенности иллюстрирует рис. 9, на котором показаны потоки электронов, полученные путем суммирования в двух энергетических интервалах 168–368 эВ и 633–1090 эВ. Во время псевдобрейкапа выделя-

ются потоки электронов вдоль силовых линий в первом из этих диапазонов, возрастания потока частиц с энергией больше 400 эВ не видно. Во время брейкапа, наоборот, нет существенных возрастаний потока электронов малых энергий, возрастают только более энергичные частицы. С энергиями электронов 1–2 кэВ как раз и ассоциируется обычно брейкап в полярных сияниях. Становится понятным, почему яркость сияний и ионосферный отклик в электроструе во время ПБ существенно слабее — недостаточна энергия и мал поток высыпавшихся частиц.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В настоящее время существует несколько моделей суббури, в которых расхождения в представлениях о характере и геометрии основных суббулевых процессов иногда противоположны и взаимоисключающи. Поскольку отличие псевдобрейкапа заключается в том, что процесс перехода от подготовительной фазы к экспансии суббури прерывается в псевдобрейкапе на определенном этапе, следует подробно рассмотреть цепочку событий начала суббури. Для того, чтобы читателю был понятен ход дальнейших обсуждений, мы начнем с краткого изложения наших представлений о развитии суббури, опираясь на работы [Лазутин и Козелова, 2004; Лазутин и др., 2007а,б].



Прежде всего, мы полагаем, что процессы, вызывающие вспышку сияний и экспансию, продольные токи и электроджет, бухтообразные магнитные возмущения и высыпания авроральных частиц — все это происходит в вавроральной магнитосфере, или как ее еще называют — геостационарной области или области квазизахвата. Первая общепринятая ступень начала суббури — вспышка полярного сияния (брейкап) и возрастание вызвавших вспышку продольных потоков электронов с энергией 0.5–5 кэВ. Появление продольных потоков низкоэнергичных электронов и связанных с ними уярчений полярных сияний — явление частое, особенно на подготовительной фазе суббури. В работе [Abel et al., 2002] по данным спутника CRRES представлен анализ наблюдений продольных потоков и проведена их классификация, по которой значительная часть событий не вызывает брейкапа суббури. Но одной из таких вспышек, в удачное время и удачном месте, удается запустить процесс начала суббури. Второй элемент цепочки, сдвинутый по времени, — диполяризация (локальная) магнитного поля и связанная с ней “инжекция”, ускорение энергичных (20–300 кэВ) электронов, повторенное несколько раз.

Суббуря с одной активизацией явление редкое, чаще всего, едва ли не всегда, наблюдаются суббури с множественным началом [Rostoker et al., 1980], с цепочкой из 3–5 активизаций длительностью по несколько минут. Уже давно высказывалось предположение, что очередная активизация готовится предыдущей, в результате чего и создается расширение возмущенной области, экспансия суббури.

Наконец, третий элемент начала суббури — появление ускоренных ионов перед инъекцией энергичных электронов. Разумеется, ионы ускоряются и во время диполяризации, но появляются они раньше, еще когда силовые линии вытянуты в хвост, и само их появление вызывает так называемый эффект взрывной подготовительной фазы [Ohtani et al., 1992] — быстрое усиление вытянутости силовых линий перед самым началом диполяризации

Преддиполяризационные возрастания ионов мы связываем с первым элементом суббури — продольными потоками электронов или как его называют — “токовым клином суббури”. В нашей схеме энергичным ионам отводится роль возбудителя следующей ступени активизации: как следствие ускорения энергичных ионов растет давление частиц, вероятность локальной взрывной неустойчивости повышается. Вполне вероятно, что именно с такой активизацией, которая дает достаточно большой поток ионов для продолжения цепочки, и начинается брейкап суббури. Поскольку ионы дрейфуют на запад, область по-

следующих активизаций постепенно смещается к вечернему сектору.

Такова схема развития суббури, и все перечисленные элементы мы находим в двух суббурях, рассмотренных выше. Посмотрим, какие элементы суббури проявляются в рассмотренных двух псевдобрейкапах, и какие отсутствуют или отличаются от типичных элементов суббури. Прежде всего, псевдобрейкапам предшествовала развитая подготовительная фаза, силовые линии магнитного поля вытягивались в хвост, запасенная в магнитном поле энергия была не меньше, чем в последующих суббурях. Диполяризация и ускорение энергичных электронов также были по интенсивности сравнимы с аналогичными суббуревыми элементами брейкапа суббури. Сходство этих элементов говорит о том, что эти два псевдобрейкапа никак нельзя назвать слабой суббурей, которая прежде всего характеризуется малой накопленной энергией и пониженной интенсивностью последующего энерговыделения. (Отметим, что в отличие от мировых бурь, где есть общепринятая градация событий по мощности, для суббурь такой градации нет).

Теперь отметим различия между ПБ и брейкапом суббури. Вспышка сияния, с которой, собственно, и начинается суббуря, во время ПБ была слабее, а возбуждающий вспышку свечения поток низкоэнергичных электронов был на порядок меньше, и средняя энергия электронов была вдвое меньше, чем во время брейкапа суббури. Второй особенностью является низкие энергетический диапазон и интенсивность возрастания энергичных протонов.

Как было установлено в работе [Лазутин и Козелова, 2004], во время суббури с каждой последующей активизацией растет поток и энергия ускоренных ионов, и в результате готовятся условия для следующей активизации. Именно такая ситуация наблюдалась и во время рассматриваемой суббури 24.01.1991 г. Рис. 10 представляет измерения энергетического спектра ионов (в предположении, что регистрируются только протоны) до начала суббури и во время двух активизаций брейкапа. Во время первой активизации ускоряются протоны с энергией в диапазоне 70–250 кэВ, во время второй 250–600 кэВ, энергия ускоренных частиц растет существенно. Как показано на рис. 10 штриховой линией, во время псевдобрейкапа возрастание по сравнению с невозмущенным спектром ионов наблюдается только в двух низкоэнергичных каналах, не захватывая энергии выше 60–80 кэВ.

Механизм подготовки последующей активизации, видимо, связан с изменением плазменного давления во время активизации за счет роста потока энергичных ионов. Такое изменение давления приводит к изменению радиального градиента дав-

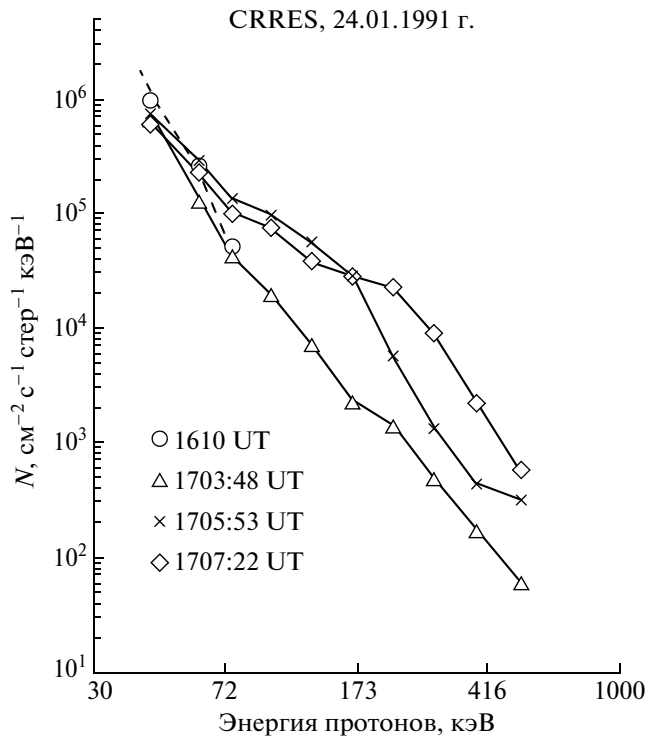


Рис. 10. Спектры авральных протонов во время ПБ (16:10 UT), перед суббурией (17:03 UT) и во время двух активизаций суббури.

ления и поперечного тока в плазме. В результате перестраивается магнитная конфигурация, и параметры удаленных от области активизации областей плазмы могут приблизиться к порогу развития неустойчивости [Lui 2004; Ohtani et al., 1993; Antonova and Ovchinnikov, 2002]. С другой стороны, увеличенный поток ионов является и стабилизирующим фактором, тормозящим быстрое развитие диполизации в данном секторе, восстанавливая частично локальное вытягивание силовых линий в хвост. Эти два фактора: торможение локальной активизации и подготовка следующей, по-видимому, не выполняются во время псевдобрейкапа, поскольку поток ускоренных ионов, измеренный на спутнике CRRES, слишком мал и мала их средняя энергия. (Разумеется, достоверные количественные критерии вместо “слишком мал” по одному случаю сделать нельзя). В результате после псевдобрейкапа следует быстрое, одноступенчатое восстановление конфигурации магнитосферы, в отличие от брейкапа, где после первой ступени активизации конфигурация вытянутых в хвост силовых линий восстанавливается, и сохраняются условия для последующих активизаций (т.е. накопленная в магнитном поле во время подготовительной фазы энергия расходуется не сразу). В работах [Koskinen et al., 1993; Ohtani et al., 1993] отмечалось, что после ПБ возобновляется подготовительная фаза и по крайней мере в течение

20 мин на данной долготе нет суббуриевых активизаций. Этот факт подтверждает наше предположение о том, что ПБ расходует накопленную энергию, т.е. приводит конфигурацию магнитосферы в относительно устойчивое состояние.

Следует отметить, что детально разработанных моделей активизации мало. Вероятно лучше всего наши данные укладывается в схему авральной активизации, предложенную в работах [Antonova, 2006; Stepanova et al. 2002], предполагающую важную роль локального магнитосферно-ионосферного взаимодействия. По этой схеме уярчение дуги сияния происходит в результате локального увеличения электрического поля при развитии квазиэлектростатической неустойчивости и переноса холодных частиц ионосферы в существовавшую до этого область продольного ускорения. Одно важное для нас предсказание схемы в том, что энергичные ускоренные ионы должны появляться до начала диполизации, что и наблюдается в эксперименте. Вместе с тем, пока наблюдаемые закономерности фрагментарны и схематичны, хорошего соответствия между теоретическими представлениями и экспериментом не может быть достигнуто.

#### 4. ВЫВОДЫ

Особенность псевдобрейкапа заключается в слабой интенсивности начальной вспышки сияний и вызвавшего ее потока низкоэнергичных электронов вдоль магнитной силовой линии. Продольный поток этих электронов был на порядок меньше и их энергия меньше вдвое во время брейкапа по сравнению с последовавшим через час брейкапом суббури. Поток энергичных ионов, ускоренных перед диполяризацией, и их энергия были также существенно меньше во время псевдобрейкапа. Мы полагаем, что эти ионы во время ПБ малоэффективны в создании условий для последующей активизации. В то же время поток энергичных электронов велик и степень диполизации велика, что приводит к значительному расходу накопленной в этом секторе энергии.

Проведенный анализ показывает, что дальнейший прогресс в понимании физики ПБ как и других суббуриевых активизаций невозможен без прямых измерений частиц в большем диапазоне энергий с хорошим (секунды) временным разрешением. Наши выводы, полученные по одному-двум случаям, могут рассматриваться как предварительные и требуют подтверждения на большем числе случаев.

Авторы благодарны Н.П. Мередиту (Британская Арктическая Служба) и А. Корту (Институт Макса-Планка, Линдау) за представленные данные CRRES и Дж. Ривсу (Лос-Аламос) за данные спутника LANL, а также сотрудникам геофизиче-

ских обсерваторий, данными которых мы воспользовались.

Авторы благодарят Е.Е. Антонову за ценные замечания.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 06-05-64225 и 06-05-65044, а также Президиумом РАН через программу “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля” и Отделением физики РАН через программу “Плазменные процессы в Солнечной системе”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козелова Т.В., Лазутин Л. Л., Козелов Б.В., Расинкангас Р., Корт А., Зингер Г. Динамика протонных инжекций во время суббури по измерениям на спутнике CRRES // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 1. С. 74–86. 1998.
- Лазутин Л.Л., Козелова Т.В. Структура суббуревых активаций в области квазизахвата // Космич. исслед. Т. 42. № 4. С. 309–311. 2004.
- Лазутин Л.Л., Козелова Т.В., Мередит Н., Даниелидис М., Козелов Б.В., Юссила Дж., Корт А. Исследование суббури 12.03.1991. Часть 1. Структура суббуревой активности и авроральные ионы // Космич. исслед. № 1. С. 31–43. 2007а.
- Лазутин Л.Л., Козелова Т.В., Мередит Н., Даниелидис М., Козелов Б.В., Юссила Дж., Корт А. Исследование суббури 12.03.1991. Часть 2. Авроральные электроны. Ускорение, инжекция и динамика // Космич. исслед. № 2. С. 99–107. 2007б.
- Abel G.A., Fazakerley A.N., Johnstone A.D. The simultaneous acceleration and pitch angle scattering of field-aligned electrons observed by the LEPA on CRRES // J. Geophys. Res. V. 107. P. 1436–1441. 2002.
- Aikio A.T., Sergeev V.A., Shukhtina M.A., Vagina L. I., Angelopoulos V., Reeves G.D. Characteristics of pseudobreakups and substorms observed in the ionosphere, at the geosynchronous orbit, and in the midtail // J. Geophys. Res. V. 104. (A6). P. 12263–12287. 1999.
- Akasofu S.-I. The development of the auroral substorm // Planet. Space Sci. V. 12. P. 273–293. 1964.
- Antonova E.E. The results of INTERBALL / Tail observations, the innermagnetosphere substorm onset and particle acceleration // Adv. Space Res. V. 30 (7). P. 1671–1676. 2002.
- Antonova E.E., Ovchinnikov I.L. Reconnection in the conditions of developed turbulence // Adv. Space Res. V. 29 (7). P. 1063–1068. 2002.
- Antonova E.E. Onset of substorm expansion phase: theory predictions and results of experimental observations // Proc. 8th Intern. Conf. Substorms. Calgary. Canada March 25–31, 2006. P. 1–7. 2006.
- Davis T.N., Hallinan T.J. Auroral spirals, 1. Observations // J. Geophys. Res. V. 81. P. 3953–3961. 1976.
- Erickson G. M., Maynard N. C., Wilson G. R., Burke W. J. Electromagnetics of substorm onsets in the near-geosynchronous plasma sheet // Proc. 5th Intern. Conf. Substorms. St.-Petersburg. Russia: May 16–20, 2000. (ESA SP-443). ed. by A. Wilson. P. 385–388. 2000.
- Hardy, D.A. Walton D.M., Johnstone A.D. Low Energy Plasma Analyzer // IEEE Trans. Nucl. Sci. V. 40. P. 246–251. 1993.
- Kamide Y. Constrains on the choises of substorm initiation theories // Proc. 4th Intern. Conf. Substorms. March 9–13. ed. by S. Kokubun and Y. Kamide. Terra sci. Tokio. P. 299–302. 1998.
- Koskinen H.E.J., Lopez R.E., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I., Baker D.N., Bosinger T. Pseudobreakup and substorm growth phase in the ionosphere and magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 98. P. 5801–5822. 1993.
- Korth A., Kremser G., Wilken B., Guttler W., Ullaland S.L., Koga R. Electron and proton wide-angle spectrometer (EPAS) on the CRRES spacecraft // J. Space. Rockets. V. 29. P. 609–614. 1992.
- Kozelova T.V., Kozelov B.V., Lazutin L.L. Local gradient of energetic ion flux during dipolarization on 6–7Re // Abs. 33rd COSPAR Scientific Assembly, 17–22 10.2002. P. XXX Houston. USA. P. 33. 2002.
- Lazutin L., Starkov G., Meng C.-I., Sibeck D.G., Stadsnes J., Bjordal J., Liou Kan, Kornilova T., Reeves G. Westward Traveling Surge dynamics and the local structure of an isolated substorm // Adv. Space Res. V. 28. № 11. P. 1623–1629. 2001.
- Lazutin L., Korth A., Kozelova T. Fast bursts of high energy protons and their role in triggering of the substorm onset instability // Proc. 6th Intern. Conf. Substorms. March 25–29, 2002. University of Washington. Seattle. Washington. USA. P. 340–346. 2002.
- Lui A. T. Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // Space Sci. Rev. V. 113 (1). P. 127–206. 2004.
- Lyons L. R., Liu S., Ruohoniemi J. M., Solov'yev S. I., Samson J. C. Observations of dayside convection reduction leading to substorm onset // J. Geophys. Res. V. 108(A3). doi: 10.1029/2002JA009670. 2003.
- Maynard N.C., Burke W.J., Basinska E.M., Erickson G. M., Hughes W.J., Singer H.J., Yahnin A.G., Hardy D.A., Mozer F.S. Dynamics of the inner magnetosphere near times of substorm onsets // J. Geophys. Res. V. 101. P. 7705–7711. 1996.
- McPherron R.L. Physical processes producing magnetospheric substorms and magnetic storms. // Geomagnetism. ed. by J.A. Jacobs. Academic press. SanDiego. 1991. P. 593–622.
- Nakamura R., Baker D.N., Yamamoto T., Belian R.D., Bering E.A., Benbrook J.R., Theall J.R. Particle and field signatures during pseudobreakup and major expansion onset // J. Geophys. Res. V. 99. P. 207–215. 1994.
- Ohtani S., Takahashi K., Zanetti L.J., Potemra T.A., McEntire R.W. Initial signatures of magnetic field and energetic particle fluxes at tail reconfiguration: explosive growth phase // J. Geophys. Res. V. 97. P. 9311–19324. 1992.
- Ohtani S., Anderson B.J., Sibeck D.G. et al. A multi satellite study of a pseudo-substorm onset in the near-Earth magnetotail // J. Geophys. Res. V. 98. P. 19355–1969. 1993.
- Onsager T. G., Rostoker G., Kim H.-J., et al. Radiation belt electron flux dropouts: Local time, radial, and particle-

- energy dependence // *J. Geophys. Res.* V. 107 (A11). P. 1382–1399. doi:10.1029/2001JA000187. 2002.
- *Pulkkinen T.I.* Pseudobreakup or substorm? // Proc. 3th Intern. Conf. Substorms. Versailles, France, May 12–17, 1996. ESA SP-389. P. 285–289. 1996.
- *Rostoker G., Akasofu S.-I., Foster J.C., Greenwald R.A., Kamide Y., Kawasaki K., Lui A.T.Y., McPherron R.L., Russell C.T.* Magnetospheric substorms-definition and signatures // *J. Geophys. Res.* V. 85. P. 1663–1668. 1980.
- *Sauvaud J.A. Winckler J.R.* Dynamics of plasma, energetic particles and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms // *J. Geophys. Res.* V. 85. P. 2043–2056. 1980.
- *Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aibel K.R.* Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // *J. Geophys. Res.* V. 107 (A7). P. Doi:10.1029/2001JA003503, 2002.