

УДК.550.388.2.,550.385,550.385.41

## МАГНИТНЫЕ БУРИ И ИХ ЭФФЕКТЫ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ. РАЗЛИЧИЯ БУРЬ РАЗНЫХ ТИПОВ

© 2011 г. С. Н. Соколов

Учреждение РАН С.-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, С.-Петербург

e-mail: sergnsokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.01.2010 г.

После доработки 26.07.2010 г.

Во время магнитных бурь (МБ) в ионосферной области  $D$  наблюдаются изменения электронной плотности и соответствующие им эффекты в распространении радиоволн. Различия проявлений МБ в нижней ионосфере обусловлены, в основном, временными и пространственными различиями высыпаний энергичных электронов. Показано, что наблюдаемые различия эффектов бурь в области  $D$  связаны с различиями соответствующих им типов МБ, выделяемыми по наблюдениям потоков энергичных ( $E \sim 0.1\text{--}2$  МэВ) электронов на  $L \approx 3\text{--}8$ . Типы бурь идентифицируются по изменению геомагнитных индексов  $ap$  и  $AE$  и по отношениям  $ap/Dst$  и  $AE/Dst$  на их восстановительной фазе.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные бури (МБ) сопровождаются различными возмущениями в ионосфере и атмосфере (например, [Baker, 2000; Danilov and Lastovicka, 2001]). В ионосферной области  $D$  (высоты  $h < 80\text{--}90$  км) изменения электронной плотности  $N_e$  возникают, главным образом, из-за вариаций скорости ионизации  $q$  при высыпаниях электронов (ВЭ) из радиационных поясов [Соколов, 1990]. Изменения  $q$  на  $h < 80$ ;  $< 70$  и  $< 60$  км создают ВЭ с энергиями  $E > 0.1$ ,  $> 0.2$  и  $> 0.5$  МэВ — частиц субрелятивистских ( $< 0.3$  МэВ) и релятивистских ( $> 0.3$  МэВ) энергий [Reagan, 1977].

На инвариантных широтах  $\Lambda \sim 60\text{--}70^\circ$  в периоды МБ наблюдается рост поглощения коротких волн (КВ) и риометрического поглощения [Дриацкий, 1974; Longden et al., 2007; 2008]. На  $\Lambda < \sim 60^\circ$  следствием МБ являются послебуревые эффекты (ПБЭ). Наблюдения поглощения длинных волн (ДВ) выявили отличия ПБЭ, связанные с различиями соответствующих им бурь [Lauter et al., 1977]. В изменениях  $f_{min}$  ПБЭ также различны по длительности и географическим масштабам [Naga and Horigai, 1979; Sato, 1980; 1981]. В диапазоне сверхдлинных волн (СДВ) различия наблюдавшихся в разные годы ПБЭ не анализировались, хотя СДВ-наблюдения позволяют получить детальную непрерывную картину развития возмущений.

Еще в 1970-х гг. координированные спутниковые и ионосферные наблюдения [Larsen et al., 1976; 1977] позволили понять причины ПБЭ. Позднее подобные эксперименты, полезные для изучения области  $D$  и понимания феномена бури в целом, проводились сравнительно редко. В конце 1990-х гг.

был прекращен мониторинг  $D$ -области по сигналам глобальной сети навигационных СДВ-передатчиков. Однако СДВ-измерения и сейчас успешно используются для изучения эффектов ВЭ в периоды МБ (например, [Клейменова и др., 2004; Peter et al., 2007; Cliverd et al., 2009]).

Спутниковые, а также ракетные [Goldberg et al., 1984; 1995; Baker et al., 1993] наблюдения показали, что ВЭ создают ионизацию, существенную для области  $D$  авроральных и средних широт, причем не только в периоды ПБЭ и ночью, но и днем, даже при минимальном и среднем уровнях ВЭ. ВЭ ведут также к росту плотностей азотных окислов и изменениям озона в мезосфере и стратосфере [Callis et al., 1991; Cliverd et al., 2009].

Среднее глобальное распределение ВЭ с  $E \approx 0.1\text{--}0.3$  МэВ [Vampola and Gorney, 1983] соответствует  $kp \approx 3$  и отличается от распределения высыпаний авроральных электронов. Интенсивность субрелятивистских ВЭ растет с широтой, начиная с  $\Lambda \approx 20^\circ$ , максимальна на  $\Lambda \approx 62^\circ$  и падает на более высоких широтах. ВЭ зависят от долготы, сильнее в южном полушарии и в области Южно-Атлантической аномалии [Vampola and Gorney, 1983; Nagai et al., 2006].

В настоящее время наблюдения релятивистских электронов в магнитосфере проводятся, главным образом, для решения задачи прогноза величин их популяций, поскольку потоки этих частиц деструктивно действуют на спутниковую аппаратуру. Наблюдения показали, что во время МБ в радиационном поле происходят наибольшие изменения потоков энергичных электронов, при этом разные в зависимости от *tuna* бурь [Friedel et al., 2002; Baker and Kanekal, 2008].

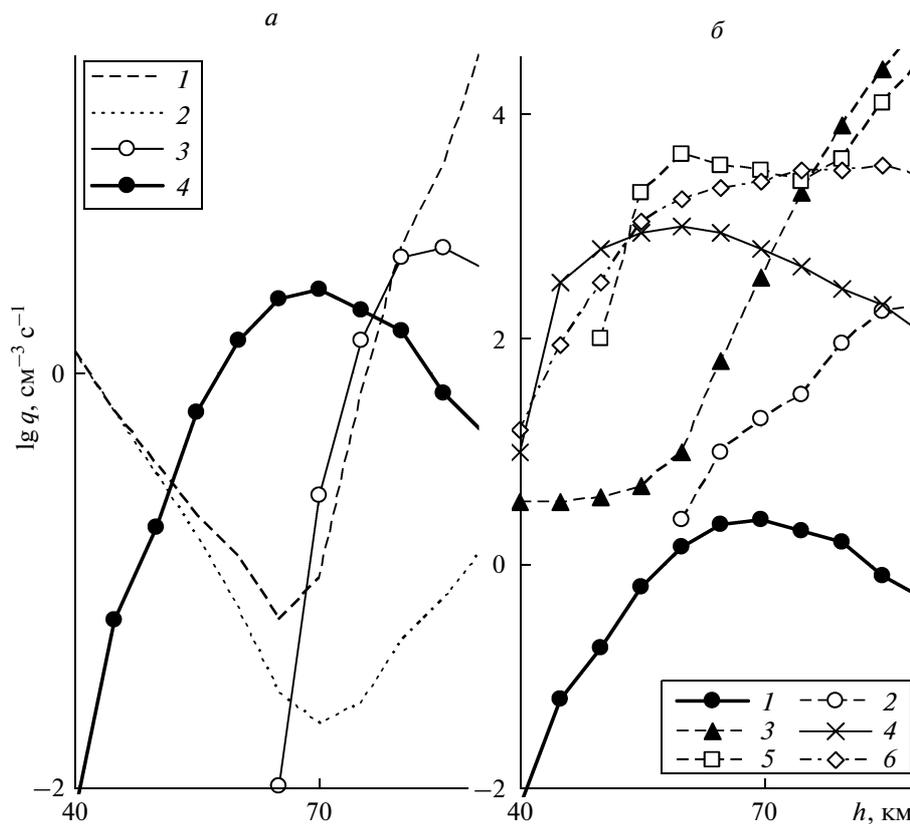


Рис. 1. Скорости ионизации на  $h = 40\text{--}90$  км в спокойных условиях (а) и в периоды МБ (б).

Разная реакция на бури популяций захваченных электронов должна вести к разной реакции на них высыпающей компоненты и, следовательно, к разным эффектам в  $D$ -области.

Цель данной работы — проверить справедливость этого предположения и выяснить причины различий ионосферных проявлений МБ. Наблюдавшиеся ранее в разные годы возмущения области  $D$  рассмотрены заново с учетом накопленной информации о вариациях захваченных и высыпающих электронов. Эффекты бурь анализируются, в основном, по СДВ- и риометрическим данным; в поглощении ДВ они обсуждались ранее (например, [Соколов, 1982]). Ниже рассмотрены: а) причины изменений области  $D$  во время МБ и различия ПБЭ; б) типы МБ и их ионосферные проявления; в) возможности идентификации типов МБ по наземным магнитным наблюдениям.

## 2. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ $Ne$ В ОБЛАСТИ $D$ ВО ВРЕМЯ МБ. ПБЭ И ИХ РАЗЛИЧИЯ

На рисунке 1 показаны невозмущенные (а) и полученные в периоды МБ (б) высотные зависимости скоростей ионизации  $q(h)$  на  $h = 40\text{--}90$  км (с шагом 5 км) для  $\Lambda \approx 60^\circ$ . Профили (1) и (2) на рис. 1а — суммарная ионизация  $q_\Sigma$  за счет галактических косми-

ческих лучей (ГКЛ) и прямого (зенитный угол  $\chi = 60^\circ$ ) и рассеянного солнечного излучения [Vampola and Gorney, 1983]. Профиль (3) — ионизация  $q_e$  за счет ВЭ с  $E^* < 0.3$  МэВ на  $\Lambda = 60^\circ$  при их *среднем* уровне [Vampola and Gorney, 1983], (4) —  $q_e$  при *минимальных* ВЭ на  $\Lambda \approx 59^\circ$  [Gaines et al., 1995]. Различия кривых (3) и (4) связаны, в основном, с разными граничными энергиями в спектрах ВЭ, взятых при расчетах  $q_e(h)$ . На рис. 1б профиль (1) тождественен профилю (4) рис. 1а, профиль (2) относится к  $\Lambda \approx 58^\circ$  и фазе восстановления МБ (декабрь 1971 г.) [Larsen et al., 1976], (3) — к  $\Lambda \approx 58^\circ$  и главной фазе (ноябрь 1993 г.) [Sharber et al., 1998], (4) — к ВЭ на  $\Lambda \approx 59^\circ$  после МБ (май 1992 г.) [Gaines et al., 1995], (5) — к  $\Lambda = 61.6^\circ$  и главной фазе (март 1975 г.) [Reagan, 1977], (6) — к послебуревым ВЭ (июль 1984 г.) с  $E > 0.5$  МэВ [Callis et al., 1991].

Из рисунка видно, что в невозмущенных условиях  $q_e > q_\Sigma$  на  $h \approx 55\text{--}90$  км ночью и на  $h \approx 55\text{--}75$  км днем. Величины  $q_e$  меняются на 2–3 порядка, достигая значений  $10^3\text{--}10^4 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , на 3–4 порядка превышающих величину  $q_\Sigma$ . На авроральных широтах скорость ионизации за счет ВЭ достигает  $10^3 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  [Imhof et al., 1978; Goldberg et al., 1984; 1995]. Во время МБ  $Ne$  может меняться из-за вариаций ионизации ГКЛ, солнечным излучением (при изменениях плотности окиси азота) и из-за изменений скорости

рекомбинации. Однако эти изменения малы [Соколов, 1990; Torkar and Friedrich, 1988; Cliver et al., 2009] по сравнению с изменениями  $Ne$  за счет вариаций  $qe$ .

Вариации  $Ne(h)$  наблюдались методами частичных отражений, взаимодействия волн и на ракетах (смотри, например, [Соколов, 1987; 1999]). Эти наблюдения немногочисленны. Основная информация о ПБЭ получена по измерениям поглощения (методы  $A1$ ,  $A3$ ), фазы и амплитуды СДВ,  $f_{min}$ . Нетрудно показать, что и риометры (метод  $A2$ ) можно использовать для мониторинга высыпаний не только авроральных, но и более энергичных электронов. Так, в работе [Callis et al., 1991] приведены профили  $qe(h)$ , рассчитанные для одного и того же спектра ВЭ и разных верхних граничных энергий в этом спектре: для интервалов  $\Delta E_1 = 38\text{--}530$  кэВ и  $\Delta E_2 = 38\text{--}1250$  кэВ. По этим профилям мы рассчитали величины  $Ne$  на  $h = 50\text{--}90$  км и соответствующие поглощения на частоте 30 МГц, взяв один и тот же высотный профиль коэффициента потерь (зима, день). Высыпанию в интервале  $\Delta E_2$  соответствовало поглощение 9.6 дБ с максимумом на  $\approx 60$  км, в интервале  $\Delta E_1$  — 4.4 дБ с максимумом на  $\approx 70$  км. Таким образом, ионизация релятивистскими ( $E > 530$  кэВ) электронами может обеспечить значительную долю полного поглощения.

Наиболее чувствительным, не считая ракетных [Danilov, 1994; Friedrich and Torkar, 1995], методом непрерывного мониторинга области  $D$  считаются СДВ-измерения. Однако наблюдения эффектов МБ в диапазоне СДВ не обобщались (в отличие от наблюдений солнечных протонных событий); мы обратились к ним и потому, что эти наблюдения дают информацию о нижней части профиля  $Ne(h)$  и высыпаниях релятивистских электронов. Так, по величинам фазовых аномалий (ФА) СДВ на протяженных ( $> \sim 1000$  км) трассах — отклонений фазы  $\Delta\Phi$  от невозмущенных значений — рассчитываются изменения высоты ионосферного волновода  $\Delta h$  (например, [Азарнин и др., 1997]).

Наблюдения ФА во время МБ 17.12.1971 г. [Larsen et al., 1977; Sato, 1980] показали одновременность послебурового понижения ( $\Delta h < 0$ ) волновода в северном полушарии на  $\Lambda < \sim 58^\circ$  в диапазоне долгот  $\approx 220^\circ$  во все часы местного времени. Отрицательные ( $\Delta\Phi < 0$ ) ФА соответствовали  $\Delta h$  до  $-10$  км и росту  $Ne$  днем в 5–8, ночью — до 20 раз [Соколов и др., 1994]. Буря привела к росту поглощения и  $f_{min}$  (днем) в обоих полушариях на  $\Lambda \approx 30^\circ\text{--}60^\circ$  [Sato, 1980]. Отсутствие роста поглощения ДВ [Lauter, 1979] и различия ФА на трассах, проходящих на разных долготах, говорят об отсутствии заметных высыпаний субрелятивистских электронов над Европой (ночью и в сумерки) и на долготную неоднородность ВЭ. Эффекты МБ 17.12.1971 г. типичны для бурь с  $Dst < -100$  нТл и для периодов наложения МБ, следующих друг за другом. В таких случаях ФА

наблюдаются обычно (но не всегда) на трассах, проходящих на  $\Lambda \sim 55^\circ\text{--}60^\circ$ .

Обобщение СДВ-наблюдений [Соколов, 1990] показало, что: а) в главную фазу бурь ФА меньше по величинам, чем в восстановительную — независимо от величин минимальных  $Dst$  — и могут быть отрицательными, положительными или отсутствовать, что соответствует понижению, повышению волновода или отсутствию ее заметных изменений (см. также [Клейменова и др., 2004]); б) в фазу восстановления длительность ФА определяется ее продолжительностью; величины  $\Delta\Phi$  (отрицательные) коррелируют с  $Dst$ , а ФА на удаленных трассах — друг с другом [Кишук и др., 1993]. Эти выводы, положенные в основу модели [Соколов и др., 1994], разумеется, не универсальны, так как основаны на ограниченном числе МБ и СДВ-трасс. Даже после больших бурь ФА могут не наблюдаться [Larsen, 1974; Hara and Horiái, 1979] или возникать днем, а ночью отсутствовать [Кишук и др., 1993]. То и другое говорит о широком диапазоне возможных изменений ВЭ.

Здесь уместно напомнить о наблюдениях  $Ne$  методом частичных отражений в Оттаве ( $\Lambda \approx 58^\circ$ ) [Montbriand and Belrose, 1976; Larsen et al., 1976], Крайстчерч ( $\Lambda \approx 48^\circ$ ) [Wratt, 1976], Горьком ( $\Lambda \approx 52^\circ$ ) [Беликович и др., 1980], Харькове ( $\Lambda \approx 45^\circ$ ) [Панасенко, Черногор, 2007] и на ракетах в Саут-Уист ( $\Lambda \approx 58^\circ$ ) [Dickinson and Bennett, 1978] и Волгограде ( $\Lambda \approx 44^\circ$ ) [Пахомов, 1981]. В периоды МБ и спорадических зимних аномалий локальные увеличения  $Ne$  в этих и некоторых других пунктах сопровождались глобальными возрастаниями поглощения и/или  $f_{min}$  в дни пиков  $kp$  или, чаще, в последующие несколько дней [Соколов, 1987; 1999; 2000]. Примеры таких изменений приведены, например, в работе [Соколов, 1999]. Аномальные профили  $Ne(h)$  (рис. 1 в работе [Соколов, 1999]) были получены в Оттаве 20, 21 и 22 февраля 1961 г. в полдень ( $\chi \approx 57^\circ$ ). Аномальный, на порядок величины, рост  $Ne$  на  $h < \sim 80$  км наблюдался в конце фазы восстановления МБ 18.02.1961 г. ( $Dst = -101$  нТл) и мог быть вызван ростом ВЭ с  $E > \sim 100$  кэВ. То, что поглощение в Европе ночью и в сумерки не “отреагировало” на эту МБ (как и на упомянутую выше бурю 17.12.1971 г.), могло быть вызвано отсутствием в Европе — в эти часы и дни — заметного высыпания. С другой стороны, поглощение и  $f_{min}$  днем 16–18.02.1961 г. были повышены в долготных секторах  $\sim 110^\circ$  в Америке и  $\sim 150^\circ$  в Евразии [Sato, 1981]. Рост  $Ne$  в Оттаве был проявлением глобального ПБЭ.

Подобные эффекты наблюдались во время нескольких МБ. Рост  $Ne$  в 3–4 раза на  $h < 80$  км днем 7–8.08.1972 г. в Крайстчерч ( $\Lambda \approx 48^\circ$ ) сопровождался ростом ВЭ [Wratt, 1976]. Буря 4–6 и 9.08.1972 г. привели к возрастанию поглощения и  $f_{min}$  в обоих полушариях [Lauter et al., 1979; Sato, 1981] и ФА на трассах над Тихим океаном ( $\Lambda < 55^\circ$ ) [Hara and Horiái, 1979], Северной ( $\Lambda < 53^\circ$ ) и Центральной ( $\Lambda <$

$< 22^\circ$ ) Америкой [Mendes da Costa and Rizzo Piazza, 1992]. Измерения в Саут-Уист после бури 1.04.1973 г. [Dickinson and Bennett, 1978] зафиксировали рост  $N_e$  днем в 4–10 раз на  $h \approx 68–85$  км – при его отсутствии на  $h > 85$  км. Этот рост подобен наблюдавшемуся в Оттаве после бурь 14.12.1970 и 17.12.1971 г. Рост  $N_e$  на  $h = 70–85$  км достигал в Оттаве фактора  $\sim 5$  [Montbriand and Belrose, 1976; Larsen et al., 1976] и в обоих случаях происходил одновременно с наблюдавшимися днем ФА [Naga and Horiai, 1979]. Измерения в Волгограде [Пахомов, 1981] выявили рост  $N_e$  в 2–3 раза (утром) на  $h = 75–85$  км 26.03–6.04.1979 г., в период следовавших одна за другой МБ. Такой рост вряд ли случаен, учитывая результаты подобных измерений, проведенных здесь в другие периоды [Соколов, 1987]; он говорит о возможности изменения ВЭ на  $L \approx 1.9$ . Аргументом в пользу этого являются данные ракетных измерений интегральных ( $E > 0.04$  МэВ) потоков электронов в Волгограде и Саут-Уист. В Волгограде они проводились до и после бури 27.09.1971 г.; при изменении  $Dst$  на  $\sim 40$  нТл поток изменился в  $\approx 25$  раз. В Саут-Уист зависимость потока от  $Dst$  подобна зависимости для Волгограда, но при тех же величинах  $Dst$  поток, в среднем, был вдвое выше; при изменении  $Dst$  на  $\sim 140$  нТл он изменился в  $\approx 10^3$  раз. С ростом  $Dst$ -потоки снижались к фоновым уровням ( $\sim 10 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в Волгограде и  $50 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в Саут-Уист). Корреляции величин потоков с  $Dst$  ( $-0.92$  в Саут-Уист и  $-0.82$  в Волгограде) [Соколов, 1983] означают, что с этим индексом связано ВЭ не только из внешнего, но и из внутреннего пояса. В Волгограде ( $L \approx 1.9$ ) высыпание могло быть вызвано изменениями потоков, подобными наблюдавшимся на  $L = 1.8–2.2$  во время умеренных МБ [Tadokoro et al., 2007].

### 3. РЕАКЦИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ЭЛЕКТРОНОВ И D-ОБЛАСТИ НА БУРИ РАЗНОГО ТИПА

Отклик потоков энергичных электронов на бури различен. Рост их интегральных популяций ( $E > 0.75$  и  $> 1$  МэВ) на  $L = 3.5–6.5$  относительно добури уровня происходил, когда  $V_z$ -компонента ММП на восстановительной фазе была отрицательной или колебалась около нуля, а скорость солнечного ветра оставалась высокой ( $v > \sim 500$  км/с) двое или более суток после минимума  $Dst$  [Ples et al., 2002]. Эти бури отнесены к типу МБ1 (эффективный, event). Спад популяции – тип МБ3 (nonevent) – наблюдался при  $V_z > 0$  и  $v < \sim 500$  км/с. Иногда выделяют тип МБ2, когда добуриевые и послебуриевые потоки заметно не отличаются; он соответствует  $V_z < 0$ , но  $v < 500$  км/с [Ples et al., 2002]. Измерения на  $L \approx 6.6$  потоков с  $E > 2$  МэВ во время 276 МБ с  $Dst < -50$  нТл показали, что 53% бурь следует относить к типу МБ1, 19% к типу МБ3 и 28% – к типу МБ2 [Reeves et al., 2003]. Близкие оценки приведены в работе [Дегтярев и Чудненко, 2007]; ее авторы

указали также, что критерии “эффективности” бурь (на  $L \approx 6.6$ ) различны в зависимости от энергий наблюдаемых электронов. Эти критерии еще более размываются, если учитывать, что рост потоков на геостационарных орбитах не всегда сопровождается их ростом на более низких  $L$  (например, [Meredith et al., 2003]). Тем не менее, деление бурь на 2 или 3 типа оказалось полезным.

Тип МБ1 соответствует высокой ( $kp > \sim 3$ ) послебуриевой возмущенности [Hilmer et al., 2000] и длительной суббуриевой активности [O'Brien et al., 2001; Meredith et al., 2003]; высокой интенсивности магнитосферных КНЧ-пульсаций [Mathie and Mann, 2000; Kozureva et al., 2007] и хоров [Smith et al., 2004; Lyons et al., 2005]; повышенной популяции на  $L > \sim 3$  субрелятивистских электронов [Meredith et al., 2003]. В области зазора между поясами ( $L \approx 2–3$ ) и во внутреннем поясе изменения потоков также различны. Их рост наблюдался здесь после МБ с  $Dst < -130$  нТл при высоких  $v$ ,  $kp$  и  $AE$  [Zheng et al., 2006]. Подобный рост (на порядок величин для  $E = 0.31–1$  МэВ) на  $L \approx 1.8–2.2$  обнаружен и во время бурь с  $Dst > -100$  нТл [Tadokoro et al., 2007].

Так как в периоды МБ временные изменения захваченных и высыпающихся в конус потерь электронов в целом подобны [Baker et al., 1993; Gaines et al., 1995; Kanekal et al., 2005], следует ожидать разной реакции  $D$ -области на бури разных типов. Анализ ряда событий показывает соответствие откликов на бури популяций магнитосферных электронов и ионосферы. Рассмотрим примеры откликов  $D$ -области на МБ разного типа.

Таблица 1 содержит список бурь 1995 г., отнесенных к тому или иному типу по наблюдениям на спутниках LANL, GOES, SAMPEX, GPS, STRV (см. [Li et al., 1997; Hilmer et al., 2000; Ples et al., 2002], а также сайт [http://leadbelly.lanl.gov/lanl\\_ep\\_data/](http://leadbelly.lanl.gov/lanl_ep_data/)). В таблице приведены даты минимумов  $Dst$ , их среднечасовые величины (<ftp://swdcb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dbase/finaldst/>), типы МБ, средние значения  $ap$ ,  $AE$  и отношений  $ap/Dst$  на восстановительной фазе. Указаны также величины максимальных ФА (в градусах) и их длительности в сутках (в скобках), оцененные нами из данных [Ionospheric Data..., 1995]. Значительные ( $> 50$  град) отрицательные ФА наблюдались (или отсутствовали, знак 0) на трассах Норвегия–Япония (НЯ,  $\Lambda < 69^\circ$ ), С. Дакота–Япония (ДЯ,  $\Lambda < 62^\circ$ ), Либерия–Япония (ЛЯ,  $\Lambda < 54^\circ$ ) и Гавайи–Япония (ГЯ,  $\Lambda \approx 26^\circ$ ). Прочерки означают, что наблюдения не проводились.

На рисунке 2а показаны (сверху вниз): вариации скорости  $v$  и плотности  $n$  солнечного ветра,  $V_z$  ММП, индексов  $Dst$ ,  $ap$ ,  $ap/Dst$ ,  $AE$  и риометрического поглощения с 18 UT 28.01 по 04 UT 8.02.1995 г., во время бури типа МБ1 ( $Dst = -56$  нТл в 00 UT 30.01.1995 г.). На рисунке 2б изменения этих величин приведены с 00 UT 7.02 по 10 UT 10.02.1995 г.; штриховая линия  $t = 0$  соответствует пику  $Dst$

**Таблица 1.** Магнитные бури разного типа в январе–июне 1995 г.

Даты минимумов <i>Dst</i>	<i>Dst</i> , нТл	Тип бури	<i>ap</i>	<i>AE</i> , нТл	<i>ap/Dst</i>	<i>НЯ</i>	<i>ДЯ</i>	<i>ЛЯ</i>	<i>ГЯ</i>
3.01.1995	−43	МБ1	20	310	−0.95	100(12)	100(11)	100(6)	100(5)
18.01.1995	−95	МБ3	7	109	−0.19	50(5)	100(5)	50(4)	0
30.01.1995	−56	МБ1	32	465	−0.86	150(8)	100(8)	50(6)	100(7)
8.02.1995	−80	МБ3	5	81	−0.16	0	100(2)	0	0
14.02.1995	−52	МБ1	18	283	−0.54	200(6)	150(7)	100(9)	50(3)
27.02.1995	−67	МБ1	34	388	−0.80	200(7)	150(6)	50(5)	0
4.03.1995	−90	МБ3	11	150	−0.30	50(3)	50(2)	0	0
12.03.1995	−70	МБ1	34	456	−0.84	300(7)	100(6)	0	0
26.03.1995	−107	МБ2	20	354	−0.44	200(5)	150(5)	50(4)	100(2)
2.04.1995	−67	МБ3	6	103	−0.22	100(2)	50(1)	0	0
7.04.1995	−149	МБ1	34	402	−0.48	200(7)	150(7)	100(6)	100(7)
24.04.1995	−53	МБ2	19	296	−0.63	100(8)	100(8)	50(9)	50(8)
3.05.1995	−58	МБ1	38	504	−0.88	100(8)	100(9)	−	100(9)
16.05.1995	−93	МБ2	20	369	−0.43	50(5)	100(6)	−	50(1)
24.05.1995	−65	МБ3	19	296	−0.45	50(1)	100(3)	0	0
1.06.1995	−46	МБ1	22	426	−0.83	50(3)	50(4)	0	50(4)
18.06.1995	−46	МБ1	24	338	−1.31	50(2)	50(3)	0	50(1)

(−80 нТл) в 10 UT 8.02.1995 г.; буря отнесена к типу МБ3. Из рисунка 2 и табл. 1 следует, что на фазе восстановления МБ1 уровни *ap* и *AE* были высокими, а после пика МБ3, напротив, быстро снизились – до *ap* < ~12, *AE* < ~100 нТл. Подобные различия наблюдались и для других бурь (табл. 1). Объединим типы МБ3 и МБ2, считая оба неэффективными: для них послебуревые популяции электронов на *L* ≈ 3–6 не превышали добуревые. На рисунке 3 для бурь типа МБ1 (9 случаев) и МБ3 + МБ2 (8 случаев) изменения *ap*, *Dst* и *AE*, полученные методом наложения эпох, показаны в первые 48 часов фазы восстановления, начиная с 3-х часового интервала, следующего за интервалом минимума *Dst*. Видно, что для МБ1 (1) величины  $\langle AE \rangle$  и  $\langle ap \rangle$  высокие (> ~300 нТл и > ~22), а восстановление *Dst* затянуто. Для МБ3 + МБ2 (2) характерен быстрый спад  $\langle AE \rangle$  (до < ~150 нТл) и  $\langle ap \rangle$  (до < ~10) и восстановление *Dst* происходит быстрее. Внизу на рис. 3 показаны средние изменения *ap*, нормированные на соответствующие им *Dst*. Отношения  $\langle ap/Dst \rangle$  введены для учета зависимости *ap* от *Dst* (например, [Loewe and Prolss, 1997]) и более детального описания восстановительных фаз, характеризующихся многообразием сочетаний *Dst*, *ap* и *AE*. Формально эти отношения соответствуют отношениям кольцевого и других, главным образом, ионосферных, токов (например, [Gonzalez et al., 1990]). Временной ход  $\langle ap/Dst \rangle$  (и не показанный ход  $\langle AE/Dst \rangle$ ) для разных типов бурь различен. Для типов МБ1 и МБ3 + МБ2 эти отношения меняются на протя-

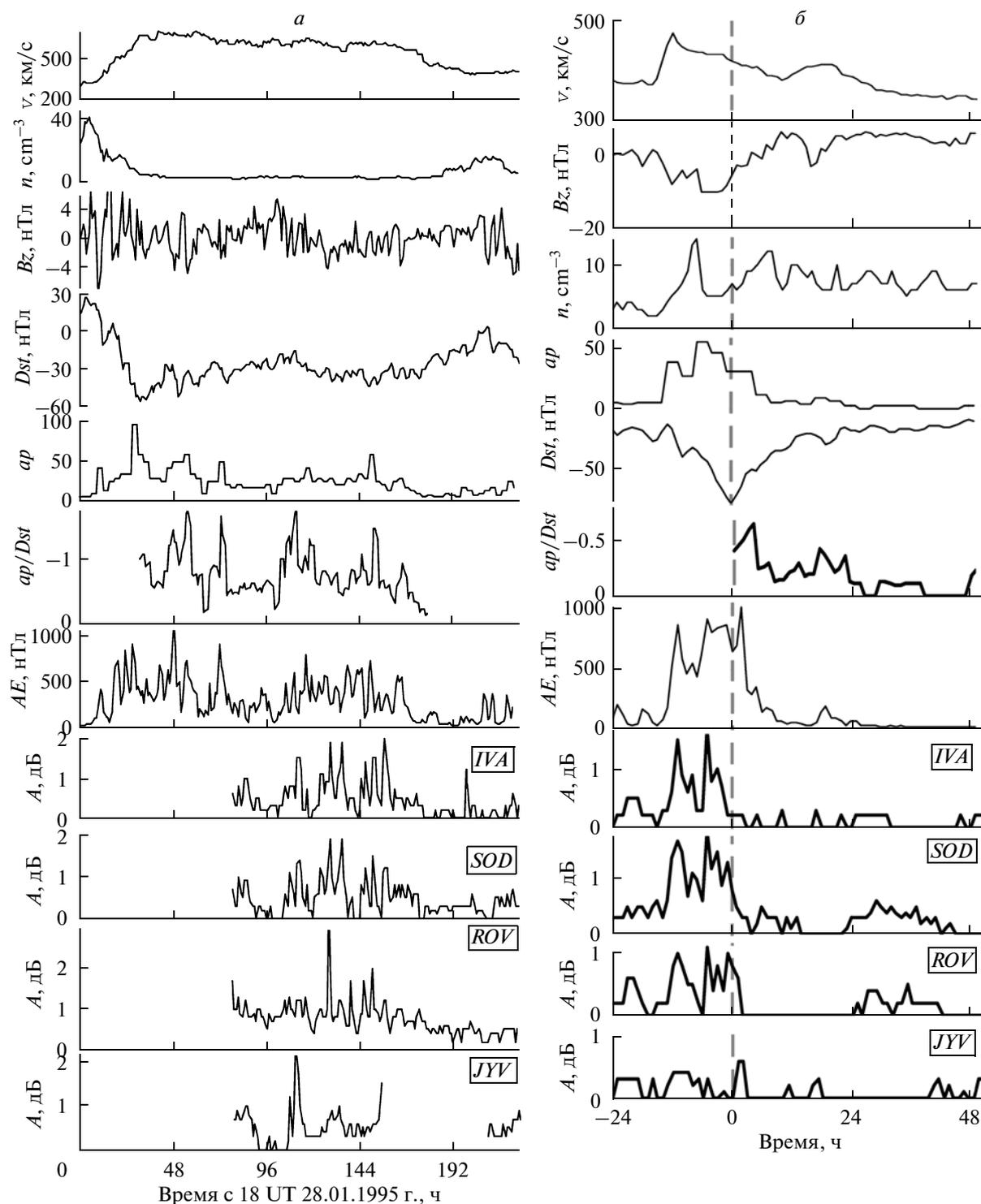
жении восстановительной фазы незначительно – по сравнению с изменениями самих индексов. Для разных типов заметно отличаются также величины отношений, усредненных за время восстановительной фазы или ее части, в данном случае, за первые 48 часов (табл. 1). Различия этих средних отношений для бурь *разного* типа заметно превышают индивидуальные различия для бурь *одного и того же* типа – несмотря на многообразие изменений величин *Dst*, *ap* и *AE*. При этом средние величины *AE* и *ap* коррелированы (*r* = 0.94). Средние величины *ap*, *AE* и *ap/Dst* для МБ разных типов приведены в табл. 2.

Итак, восстановительные фазы можно охарактеризовать величинами отношений магнитных индексов; эти отношения могут быть использованы для оценок, в том числе ретроспективных, вероятного послебуревоего поведения энергичных электронов на *L* ~ 3–7 без привлечения данных об их потоках и информации о солнечном ветре.

**Таблица 2.** Средние значения индексов *ap*, *AE* и отношений *ap/Dst* для бурь разных типов января–июня 1995 г.

Типы бурь	<i>ap</i>	<i>AE</i> , нТл	<i>ap/Dst</i>
МБ1	28.4 (7.4)	397 (75)	−0.83 (0.24)
МБ3 + МБ2	13.4 (6.8)	220 (121)	−0.35 (0.16)
все типы	21.4 (10.4)	314 (132)	−0.61 (0.32)

*Примечание.* В скобках приведены величины стандартных отклонений.



**Рис. 2.** Вариации солнечного ветра, магнитной активности и риометрического поглощения во время МБ1 30.01.1995 г. (а) и МБ3 8.02.1995 г. (б).

Сравним реакцию ионосферы на МБ разного типа. Внизу на рис. 2 показаны изменения максимальных за час величин поглощения во время МБ1 30.01.1995 г. (а) и МБ3 8.02.1995 г. (б) в Ivalo (IVA),

$\Lambda = 64.9^\circ$ ; Sodankyla (SOD),  $\Lambda = 63.8^\circ$ ; Rovaniemi (ROV),  $\Lambda = 63.2^\circ$  и Jyväskylä (JYV),  $\Lambda = 58.8^\circ$ . Данные риометров [Ionospheric absorption..., 1995] имелись только с 1.02.1995 г. После пика МБ1 поглощение в

IVA, SOD и ROV выросло во все часы местного времени до 1–2 дБ и его спад наступил только в конце восстановительной фазы, 5–6.02.1995 г. Рост поглощения утром и днем 1–3 и 6–7.02.1995 г. наблюдался и в JYV. Таким образом, во время МБ1 поглощение возросло на широтах  $\Lambda$  от  $\sim 59^\circ$  (или ниже) до  $\sim 65^\circ$  (или выше). Во время МБ3 его заметный рост произошел только в главную фазу. На фазе восстановления роста не было, кроме небольших ( $< \sim 0.5$  дБ) увеличений в SOD и ROV. В JYV рост наблюдался только в 11–12 UT 8.02.1995 г., в начале восстановления. Эффекты МБ3 в поглощении (по сравнению с эффектами МБ1) были значительно менее продолжительными. На фазе восстановления они почти не проявились, ограничиваясь узкой широтной полосой (или пятном) на  $\Lambda = 63.2^\circ\text{--}63.8^\circ$ , значительно более узкой, чем в период МБ1. По наблюдениям в магнитосфере после МБ1 30.01.1995 г. рост потоков релятивистских, а также субрелятивистских (LANL) электронов произошел на  $\Lambda \approx 58^\circ\text{--}72^\circ$ ; после МБ3 8.02.1995 г. на этих широтах наблюдался их спад. Такие изменения согласуются с картиной поглощения. Следовательно, ВЭ после МБ 8.02.1995 г. — если они были — могли произойти только на средних широтах.

Обратимся к данным СДВ-наблюдений. Их мы сопоставили с календарем бурь января–июня 1995 г. Оказалось, что *все без исключения* длительные (от суток до недели и более) заметные по величинам ФА имели место во время и/или после МБ, а в другие периоды отсутствовали. Аномалии могли быть вызваны только ВЭ, так как солнечные протонные события в этот период не наблюдались. Во-вторых, величины ФА, их длительности и само появление или отсутствие на той или иной трассе оказались независимыми от величины бури ( $Dst$ ), но зависимыми от их типа (табл. 1). Эта зависимость проявилась в том, что: а) величины и длительности ФА были, как правило, максимальны для МБ1 и МБ2; б) тип МБ1 соответствовал, в большинстве случаев, ФА на всех трассах, то есть, ВЭ на  $\Lambda$  от  $25^\circ\text{--}54^\circ$  до  $\Lambda \approx 69^\circ$ ; в) бури типа МБ2 и, особенно, МБ3, чаще сопровождалась ФА только на трассах *НЯ* и *ДЯ*, то есть, ВЭ только на  $\Lambda > \sim 54^\circ$ .

МБ1 30.01.1995 г. сопровождалась аномалиями на всех трассах. После МБ3 8.02.1995 г. ФА наблюдались только на трассе *ДЯ*. Это значит, что соответствующее этой МБ3 высыпание было достаточно интенсивным только на  $\Lambda \approx 55^\circ\text{--}62^\circ$  (или в еще более узкой полосе широт). Участок трассы *ДЯ* в этом широтном интервале как минимум в 5 раз длиннее аналогичного участка трассы *НЯ*. Поэтому возможный эффект ВЭ на трассе *НЯ* был, как минимум, в 5 раз меньше и мог остаться незаметным. Возможно, проявилась и долготная зависимость — более интенсивное ВЭ на субавроральных широтах западного полушария, то есть, опять-таки, на трассе *ДЯ*. Действительно, риометры выявили лишь узкую по-

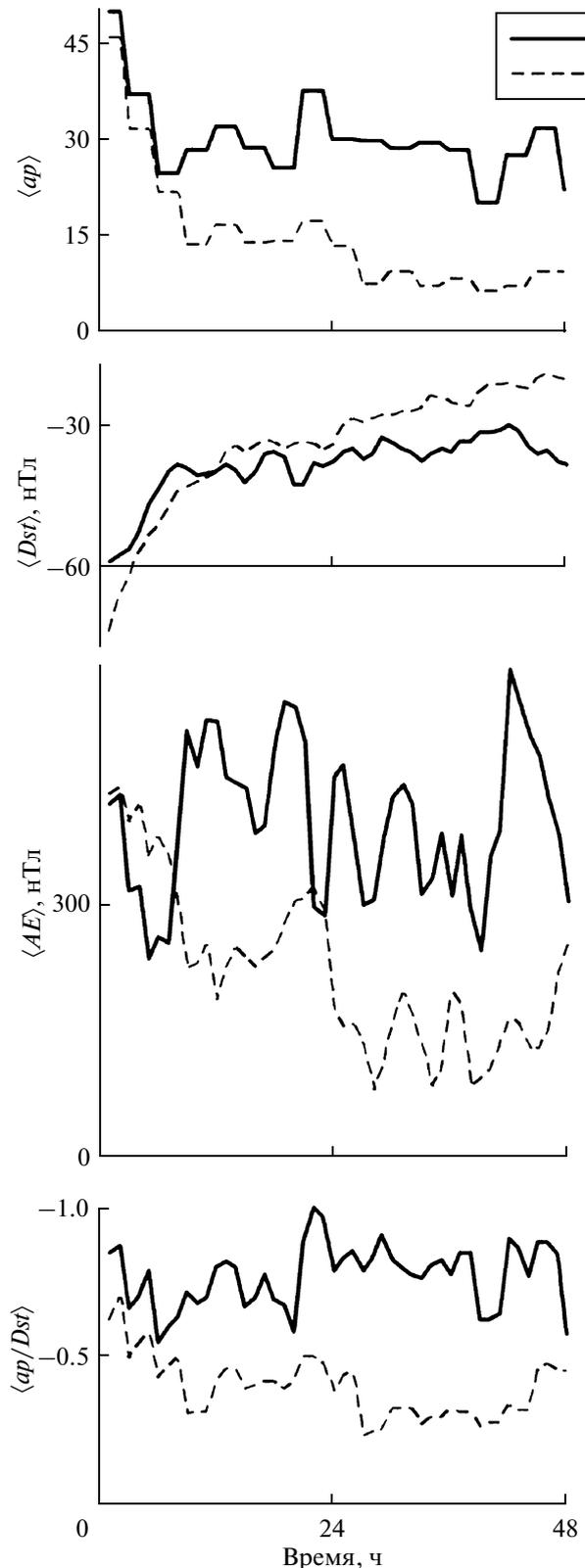


Рис. 3. Изменения индексов и их отношений на фазе восстановления МБ разных типов в 1995 г.

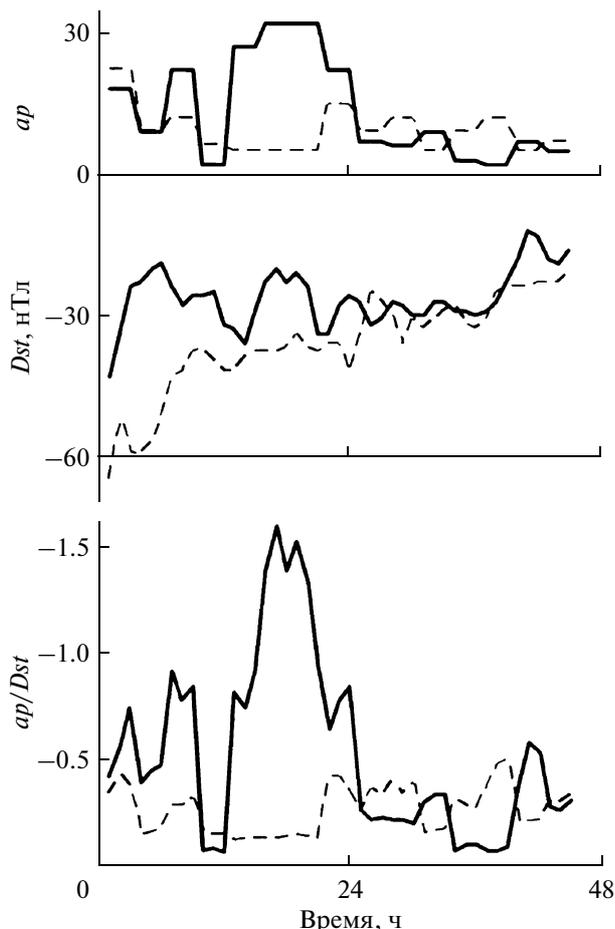


Рис. 4. То же для МБ1 29.10.1972 г. и МБ3 16.05.1972 г.

лосу ВЭ на долготах, близких к высокоширотному участку трассы НЯ.

Рассмотрим другой пример разной реакции  $D$ -области на МБ [Larsen, 1974]. Ларсен опубликовал данные измерений фазы СДВ на трассах Гавайи–Норвегия (ГН), Нью-Йорк–Норвегия (НН) и Тринидад–Норвегия (ТН) во время бурь 29.10.1971 г. и 16.05.1972 г. Трасса ГН пересекает средние, авроральные широты и полярную шапку, и около ее половины расположено на  $\Lambda > 66^\circ$ . Трасса НН на 60% расположена в авроральных и на 40% – на средних широтах. Около 25% трассы ТН проходит на  $\Lambda \approx 60^\circ$ – $62^\circ$ .

Во время МБ 29.10.1971 г. ( $Dst = -47$  нТл) на всех трассах ночью и днем наблюдались ФА, максимальные на восстановительной фазе. Поглощение на риометре в Godhavn ( $\Lambda \approx 76^\circ$ ) не возросло, а в Sondre Stromfjord ( $\Lambda \approx 73^\circ$ ) и Narssassuaq ( $\Lambda \approx 66^\circ$ ) увеличилось [Larsen, 1974]. На  $\Lambda \approx 73^\circ$  кратковременные возрастания поглощения в начале восстановительной фазы наложились на его дальнейшее плавное увеличение (до  $\sim 0.4$  дБ) 30–31.10.1971 г. На  $\Lambda \approx 66^\circ$  наблюдался большой (до 1 дБ) медленный после-

буревый рост и суббуревые всплески. Таким образом, буря сопровождалась длительным – более 3-х суток – высыпанием, приполюсная граница которого располагалась на  $\Lambda \approx 74^\circ$ – $75^\circ$ . Среднеширотные наблюдения [Schwentek, 1974; Wakai et al., 1974] показали ПБЭ в поглощении на  $\Lambda > \sim 25^\circ$ . Во время и после МБ 16.05.1972 г. ( $Dst = -79$  нТл) ФА на трассах НН и ГН не было. На трассе ТН они наблюдались ночью вблизи пика главной фазы. Наблюдения поглощения [Lauter, 1979] и измерения  $Ne(h)$  днем на ракете в Шотландии [Beunon and Williams, 1976] показали слабый и непродолжительный эффект этой МБ. Небольшой рост поглощения был в Германии, но отсутствовал в Шотландии; профиль  $Ne(h)$  на  $h = 70$ – $90$  км также не отличался от невозмущенных. Таким образом, эффект МБ был ограничен главной фазой.

Рассмотрим, как менялись геомагнитные индексы в ходе этих событий. На рис. 4 изменения  $ap$ ,  $Dst$  и  $ap/Dst$  для бурь 29.10.1972 г. (сплошные линии) и 16.05.1972 г. (штриховые линии) показаны в течение 45-ти часов после минимумов  $Dst$ . Бурю 29.10.1972 г. характеризует высокая активность на фазе восстановления, временной ход отношений  $ap/Dst$  и  $AE/Dst$  подобен их ходу для типов МБ1 (или МБ2), а средние величины этих отношений близки к средним для этих типов (табл. 2). МБ 16.05.1972 г. по этим критериям следует отнести к типу МБ3. Очевидно, различия ионосферных эффектов этих двух бурь можно связать с различием их типов.

На рисунке 5 изменения  $ap$ ,  $Dst$  и величин их отношений в первые 48 часов восстановительной фазы показаны для пяти изолированных бурь (с  $Dst$  от  $-58$  нТл до  $-181$  нТл), ионосферные эффекты которых обсуждались в статье [Naga and Horiai, 1979]. Это МБ 17.08, 7.11, 14.12.1970 г., 7.05.1971 г. и 9.08.1972 г.; на рисунке им соответствуют кривые 1, 2, 3, 4 и 5. ФА на трассе NLK–Япония ( $\Lambda < \sim 55^\circ$ ) не наблюдались только в одном случае – после МБ 7.11.1970 г. Из рисунка 5 видно, что буря отличалась от других быстрым спадом  $ap$  и отсутствием его возрастаний на фазе восстановления. (Для других пяти МБ, сопровождавшихся, согласно [Naga and Horiai, 1979], аномалиями фазы, в первые 48 часов после минимумов  $Dst$  произошли значительные усиления кольцевого тока и магнитной активности, связанные с последующими возмущениями. Эти “сложные”, составные, фактически, не изолированные бури, подобные рассмотренным в работе [Kamide et al., 1998], формально следует отнести к типу МБ1. Однако сравнение таких событий с “простыми”, изолированными, некорректно.) Бури на рис. 5, включая МБ 7.05.1971 г., относятся к типам МБ2 или МБ3: для них средние отношения  $|ap/Dst|$  лежат в интервале 0.23–0.44 (сравни табл. 2); только для МБ 7.05.1971 г. это отношение равно 1.26 и ее следует отнести к типу МБ1. Следовательно, и бури типов МБ2 и МБ3 могут сопровождаться ПБЭ (на данной трассе). Однако, как видно из рис. 5, только для МБ

7.11.1970 г. спад  $ap$  подобен его спаду для типа МБ3; остальные события отличаются заметными возрастаниями  $ap$  (типичными для МБ1 и МБ2). Таким образом, практически полное отсутствие возмущенности на восстановительной фазе и было, по-видимому, причиной отсутствия ПБЭ бури 7.11.1971 г. Мы вновь приходим к выводу, что геомагнитная активность на восстановительной фазе необходима для возникновения ПБЭ.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры указывают на связь изменений электронной плотности в области  $D$  с вариациями популяций энергичных электронов радиационного пояса и с их высыпаниями. На фазе восстановления МБ эта связь проявляется наиболее заметно. Послебуревые изменения потоков электронов и  $D$ -области контролируются одними и теми же параметрами солнечного ветра, вариации которых различны для бурь разных типов. Из сказанного следует, что:

1. Длительность, интенсивность и географический масштаб эффектов изолированных МБ в области  $D$  зависят от их типа и не зависят от величины  $Dst$ .

2. Бури типа МБ1 сопровождается длительным, интенсивным, захватывающее сравнительно большой интервал широт ВЭ; на фазе восстановления наблюдается рост риометрического поглощения в широкой полосе авроральных широт и аномалии фазы СДВ на средних широтах.

3. Бури типа МБ3 и, отчасти, МБ2 сопровождаются менее продолжительными и интенсивными ионосферными эффектами, наиболее заметные в главную фазу (пример эффектов МБ3 в поглощении приведен недавно в статье [Longden et al., 2007]). На фазе восстановления эти эффекты малозаметны или отсутствуют, что связано, вероятно, с менее интенсивным и/или менее жесткими ВЭ в узкой полосе широт.

4. Изолированные бури разных типов отличаются поведением индексов  $ap$  и  $AE$  и величинами отношений  $ap/Dst$  и  $AE/Dst$ . Это позволяет опознавать тип бури, то есть тип реакции на нее потоков энергичных электронов радиационного пояса, по стандартным магнитным индексам.

Автор благодарен А.В. Широчкову, О.М. Распопову и А.Е. Левитину за помощь и полезные дискуссии; Н. Ranta и В.А. Сергееву – за данные риометров; М. Henderson, G. Reeves и R. Friedel – за возможность доступа к данным спутников *LANL*; N. Papitashvili и Международным Научным Центрам *NSSDC/GSFC NASA* и *WDC-C2* – за данные о солнечном ветре и магнитных индексах.

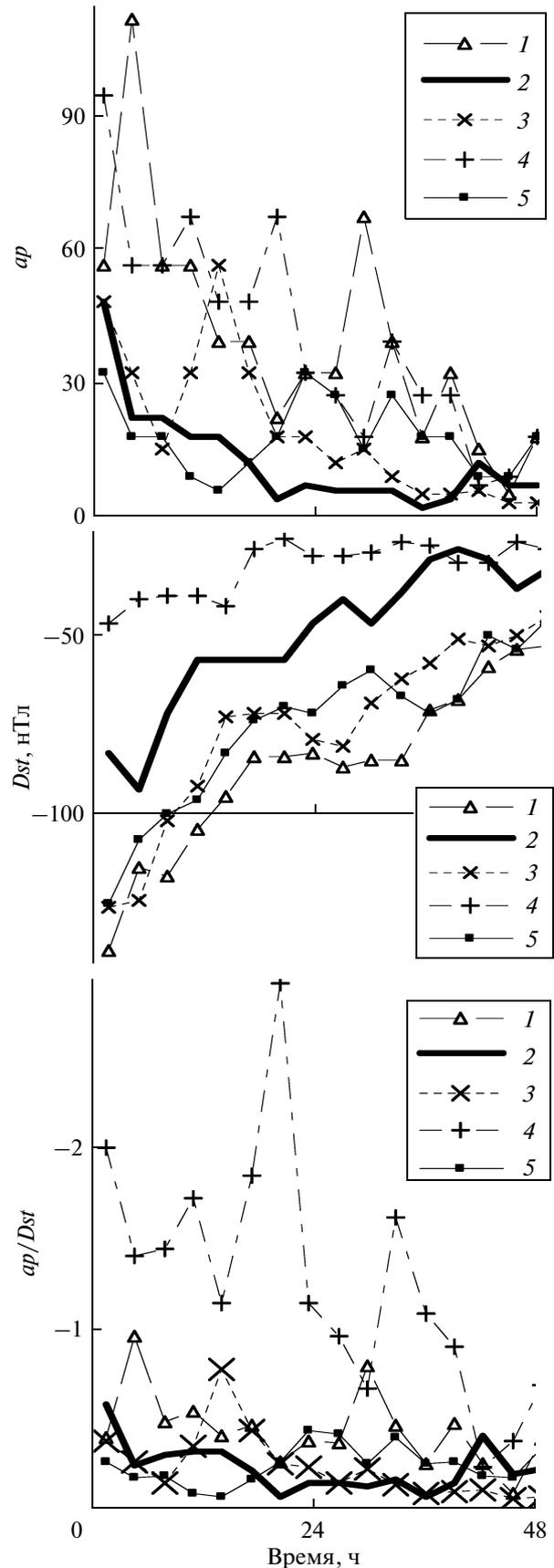


Рис. 5. То же для бурь 1970–1972 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

- Азарнин Г.В., Орлов А.Б., Пронин А.Е и др. Прогнозирование СДВ-полей при солнечных протонных событиях, внезапных ионосферных возмущениях и в послепорывные периоды // Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 27. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та. С. 77 – 90. 1997.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Гришкевич Л.В. Ночная ионизация D-области умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 20. № 3. С. 547–548. 1980.
- Дегтярев В.И., Чудненко С.Э. Индикаторы увеличения потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 11–17. 2007.
- Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат. 224 с. 1974.
- Кишук В.П., Марченко С.Г., Соколов С.Н. Эффекты крупномасштабного высыпания релятивистских магнитосферных электронов во время и после геомагнитной бури 27–28 ноября 1990 г. по данным распространения СДВ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 4. С. 93–100. 1993.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Рожной А.А., Соловьева М.С. Вариации параметров СДВ сигналов на радиотрассе Австралия–Камчатка во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 3. С. 385–393. 2004.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г. Оценка уровня дневной волновой геомагнитной активности во время магнитных бурь с помощью нового ULF-индекса // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 511–519. 2008.
- Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Проявление магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 5. С. 646–658. 2007.
- Пахомов С.В. Одновременные ракетные измерения электронной концентрации области D ионосферы полярных, средних и экваториальных широт // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. № 5. С. 934–936. 1981.
- Соколов С.Н. Эффекты магнитосферных бурь в среднеширотной нижней ионосфере // Магнитосферные исслед. № 1. Под ред. М.И. Пудовкина. М.: Радио и связь. С. 91–109. 1982.
- Соколов С.Н. Положение кольцевого тока и вариации потоков высыпающихся электронов в средних широтах // Магнитосферные исслед. Под ред. М.И. Пудовкина. № 2. М.: ВИНТИ. С. 103–108. 1983.
- Соколов С.Н. О связи аномалий сигналов СДВ на протяженных трассах с кольцевым током магнитосферной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 6. С. 923–927. 1986.
- Соколов С.Н. О связи изменений электронной концентрации в среднеширотной нижней ионосфере с интенсивностью кольцевого тока // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 3. С. 388–392. 1987.
- Соколов С.Н. Эффекты магнитосферных бурь в нижней ионосфере. Автореферат дисс. к.ф.-м.н. ЛГУ. 15 с. 1990.
- Соколов С.Н. Явление спорадической зимней аномалии в области D и геомагнитная активность. 1. Банк данных. Анализ наблюдений в Оттаве, Пенсильвании, на о. Сардиния, о. Уоллопс и в Кивино // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 3. С. 88–100. 1999.
- Соколов С.Н. Явление спорадической зимней аномалии в области D и геомагнитная активность. 2. Анализ наблюдений в Саут Уист и Уайт Сендс // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 1. С. 63–67. 2000.
- Соколов С.Н., Штенников Ю.В., Орлов А.Б., Пронин А.Е. Оценка величины послепорывных эффектов, вызываемых потоками высыпающихся магнитосферных электронов, при распространении СДВ сигналов на среднеширотных трассах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 2. С. 107–113. 1994.
- Baker D.N. Effects of the Sun on the Earth's environment // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. № 17–18. P. 1669–1681. 2000.
- Baker D.N., Goldberg R.A., Herrero F.A., Blake J.B., Callis L.B. Satellite and rocket studies of relativistic electrons and their influence on the middle atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 55. № 13. P. 1619–1628. 1993.
- Baker D.N., Kanekal S.G. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 2–4. P. 195–206. 2008.
- Beynon W.J.G., Williams E.R. Rocket measurements of D-region electron density profiles // J. Atmos. Terr. Phys. V. 38. № 12. P. 1319–1325. 1976.
- Callis L.B., Baker D.N., Blake J.B., et al. Precipitating relativistic electrons: their long-term effect on stratospheric odd nitrogen levels // J. Geophys. Res. V. 96. № D2. P. 2939–2976. 1991.
- Cliverd M.A., Seppala A., Rodger C.J., et al. Additional stratospheric NO<sub>x</sub> production by relativistic electron precipitation during the 2004 spring NO<sub>x</sub> descent event // J. Geophys. Res. V. 114. A04305. doi: 10.1029/2008JA013472. 2009.
- Danilov A.D. Rocket research in the middle atmosphere // Proceedings of the 11th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research. Montreux, 24–28 May 1993. Ed. E.J. Rolfe. ESA SP-335. P. 321–325. 1994.
- Danilov A.D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Intern. J. Geomagn. Aeron. V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.
- Dickinson P.H.G., Bennett F.D.G. Diurnal variations in the D-region during a storm after-effect // J. Atmos. Terr. Phys. V. 40. № 5. P. 549–558. 1978.
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere. – A review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 2. P. 265–282. 2002.
- Gaines E.E., Chenette D.L., Imhof W.L., Jackman C.H., Winningham J. Relativistic electron fluxes in May 1992

- and their effect on the middle atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 100. № D1. P. 1027–1033. 1995.
- Goldberg R.A., Jackman C.H., Barcus J.R., Soraas F. Nighttime auroral energy deposition in the middle atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 89. № A7. P. 5581–5596. 1984
- Goldberg R.A., Baker D.N., Herrero F.H., et al. Mesospheric heating during highly relativistic electron precipitation events // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 47. № 11. P. 1237–1247. 1995.
- Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Tsurutani B.T. On the equivalence of the solar wind coupling parameter  $\epsilon$  and the magnetospheric output parameter  $U_T$  during intense geomagnetic storms // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 3. P. 341–342. 1990.
- Hara T., Hori K. Geomagnetic disturbances and associated phase anomalies of VLF radio waves at midlatitudes // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 31. № 2. P. 75–85. 1979.
- Hilmer R.V., Ginet G.P., Cayton T.E. Enhancement of equatorial energetic electron fluxes near  $L = 4, 2$  as result of high speed solar wind streams // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A10. P. 23311–23322. 2000.
- Imhof W.L., Reagan J.B., Gaines E.E., et al. Coordinated measurements of ELF transmission anomalies and the precipitation of energetic particles into the ionosphere // *Radio Sci.* V. 13. № 4. P. 717–727. 1978.
- Iles R.H.A., Fazakerly A.N., Johnstone A.D., Meredith N.P., Buhler P. The relativistic electron response in the outer radiation belt during magnetic storms // *Ann. Geophysicae.* V. 20. № 7. P. 957–965. 2002.
- Ionospheric Data in Japan.* Tokyo: NIPR. 1995.
- Ionospheric absorption data from Finland.* The Finnish Academy of Science and Letters: 1995.
- Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., et al. Two-step development of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A4. P. 6917–6921. 1998.
- Kane S.G., Friedel R.H.W., Reeves G.D., et al. Relativistic electron events in 2002: Studies of pitch angle isotropization // *J. Geophys. Res.* V. 110. A12224, doi:10.1029/2004JA010974. 2005.
- Kozyreva O., Pilipenko V., Engebretson M.J., et al. In search of a new ULF wave index: comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons // *Planet. Space Sci.* V. 55. № 6. P. 755–769. 2007.
- Larsen T.R. Preliminary discussion of ELF and VLF propagation data // *ELF-VLF Radio Wave Propagation.* Ed. J.A. Holtet. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland. P. 285–289. 1974.
- Larsen T.R., Reagan J.B., Imhof W.L., Montbriand L.E., Belrose J.S. A coordinated study of electron precipitation and D-region electron densities over Ottawa during disturbed conditions // *J. Geophys. Res.* V. 81. № 13. P. 2200–2212. 1976.
- Larsen T.R., Potemra T.A., Imhof W.L., Reagan J.B. Energetic electron precipitation and VLF phase disturbances at middle latitudes following the magnetic storm of December 16, 1971 // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 10. P. 1519–1524. 1977.
- Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 58. № 7. P. 831–843. 1996.
- Lauter E.A. A catalogue of particle induced ionospheric absorption at mid-latitudes 1948-78 // *Z. Meteorol.* V. 29. № 5. P. 279–292. 1979.
- Lauter E.A., Bremer J., Grafe A., et al. The post storm ionization enhancements in the mid-latitude D region and related electron precipitation from the magnetosphere // *HHI-STP-Rep.* № 9. Berlin: 1977.
- Li X., Baker D.N., Temerin M., et al. Are energetic electrons in the solar wind the source of the outer radiation belt? // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. № 8. P. 923–926. 1997.
- Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997.
- Longden N., Honary F., Kavanagh A.J., Manninen J. The driving mechanisms of particle precipitation during the moderate geomagnetic storm of 7 January 2005 // *Ann. Geophysicae.* V. 25. № 9. P. 2053–2068. 2007.
- Longden N., Denton M.H., Honary F. Particle precipitation during ICME-driven and CIR-driven geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 113. A06205, doi:10.1029/2007JA012752. 2008.
- Lyons L.R., Lee D.-Y., Thorne R.M., Horne R.B., Smith A.J. Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streamers // *J. Geophys. Res.* V. 110. A11202, doi:10.1029/2005JA011254. 2005.
- Mathie R.A., Mann I.R. A correlation between extended intervals of ULF wave power and storm time geosynchronous relativistic electron flux enhancements // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 20. P. 3261–3264. 2000.
- Mendes da Costa A., Rizzo Piazza L. Diurnal lower ionosphere electron density variations observed in the South Atlantic Geomagnetic Anomaly and sub-Antarctic region during the occurrence of the major PCA event of August 4, 1972 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 54. № 7–8. P. 903–913. 1992.
- Meredith N.P., Cain M., Horne R.B., et al. Evidence for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies from a survey of geomagnetically disturbed periods // *J. Geophys. Res.* V. 108. A61248, doi:10.1029/2002JA009764. 2003.
- Montbriand L.E., Belrose J.S. Changes in electron precipitation inferred from spectra deduced from D region electron densities during a post-magnetic storm effect // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 13. P. 2213–2222. 1976.
- Nagai T., Yukimatu A.S., Matsuoka A., et al. Time-scales of relativistic electron enhancements in the slot region // *J. Geophys. Res.* V. 111. A11205, doi:10.1029/2006JA011837. 2006.
- O'Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D., et al. Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit? // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A8. P. 15533–15544. 2001.
- Peter W.B., Chevalier M.W., Inan U.S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 111. A03301, doi:10.1029/2005JA011346. 2006.

- Reagan J.B.* Ionization processes // Dynamical and Chemical Coupling between the Neutral and Ionized Atmospheres. Eds. B. Grandal and J.A. Holtet. Dordrecht–Boston. P. 145–160. 1977.
- Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P.* Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. P. 1529, doi:10.1029/2002GL016513. 2003.
- Sato T.* Morphological features of the winter anomaly in ionospheric absorption of radio waves at middle latitude // *J. Geophys. Res.* V. 85. № 1. P. 197–206. 1980.
- Sato T.* Geomagnetic control of the winter anomaly in absorption of radio waves at mid-latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 86. № A11. P. 9137–9151. 1981.
- Schwentek H.* Some results obtained from the European cooperation concerning studies of the winter anomaly in ionospheric absorption // *Methods of Measurements and Results of Lower Ionosphere Structure*. Ed. K. Rawer. Berlin. P. 293–303. 1974.
- Sharber J.R., Frahm R.A., Link R., et al.* UARS particle environment monitor observations during the November 1993 storm: Auroral morphology, spectral characterization, and energy deposition // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A11. P. 26307–26322. 1998.
- Smith A.J., Meredith N.P., O'Brien T.P.* Differences in ground-observed chorus in geomagnetic storms with and without enhanced relativistic electron fluxes // *J. Geophys. Res.* V. 109. № A11, doi: 10.1029/2004JA01049. 2004.
- Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., et al.* Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms // *Ann. Geophysicae.* V. 25. № 6. P. 1359–1364. 2007.
- Torkar K.M., Friedrich M.* Empirical electron recombination coefficients in the *D*- and *E*-region // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 50. № 8. P. 749–761. 1988.
- Vampola, A. L., Gorney, D. J.* Electron energy depositions in the middle atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 88. № A8. P. 6267–6274. 1983.
- Wakai N., Ouchi C., Nemoto C.* Spatial extent of the winter anomaly in absorption // *Methods of Measurements and Results of Lower Ionosphere Structure*. Ed. K. Rawer. Berlin. P. 307–311. 1974.
- Wratt D.S.* Ionisation enhancement in the middle latitude *D*-region due to precipitating high energy electrons // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 38. № 5. P. 511–516. 1976.
- Zheng Y., Lui A.T.Y., Li X., Fok M.-C.* Characteristics of 2–6 MeV electrons in the slot region and inner radiation belt // *J. Geophys. Res.* V. 111. A10204, doi:10.1029/2006JA011748. 2006.