

УДК 550.385.36

© 1993 г. Я.И. Фельдштейн, Л.А. Дремухина, У.Б. Вещезерова,  
С.А. Голышев, Л.Р. Кизирия, А. Графе

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД ИНТЕНСИВНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ

Интенсивность асимметричной части магнитного поля кольцевого тока тесно связана с потоком энергии, поступающей в магнитосферу из солнечного ветра. Асимметрия нарастает быстрее, чем поле кольцевого тока, на главной фазе магнитной бури и быстрее уменьшается на фазе восстановления. Основная часть поля геомагнитных возмущений рассчитывается методом линейной фильтрации в предположении, что магнитосфера функционирует как линейная система. Количественное описание индексов авроральной активности и поля кольцевого тока предполагает использование данных о параметрах солнечного ветра за несколько предшествующих часов.

1. Моделирование магнитного поля кольцевого тока ( $DR$ ) на поверхности Земли во время магнитных бурь в зависимости от параметров солнечного ветра выполнялось многими авторами, сводка таких моделей содержится в [1]. Модель [2] достаточно хорошо описывает изменение симметричной части  $DR$  в течении магнитных бурь различной интенсивности при принятых значениях функции инжекции  $F$  и параметра распада кольцевого тока  $\tau$ . Ниже проведено сопоставление результатов расчета по модели [2] с наблюдаемыми вариациями  $DR$  симметричной части поля кольцевого тока, в интервале интенсивной бури 31.03.—03.04. 1973. Величина  $DR$  вычислялась за каждый час UT осреднением отклонений значений горизонтальной компоненты поля по долготной цепочке из восьми обсерваторий от уровня спокойного дня, за который принят 12.04.1973. Асимметрия ( $ASY$ ) определялась как разность между максимальными и минимальными значениями  $\Delta H$  по долготной цепочке обсерваторий в каждый час UT с учетом асимметричной части поля DCF токов. Цель данной статьи — установление количественных связей  $ASY$  с геоэффективными параметрами солнечного ветра и моделирование  $ASY$  на средних и низких широтах.

2. В нижней части рис. 1 приведены вариации часовых значений  $DR$  наблюдаемых ( $DR_n$ ) и модельных ( $DR_m$ ). В 19—21 UT 31 марта интенсивность  $|DR_n|$  достигает экстремума, уменьшаясь до минимальных значений в 07 UT 1 апреля. Этот экстремум связан с поворотом  $B_z$ -компоненты ММП к югу в 16—20 UT и к северу в 21—02 UT [3]. Усиление  $|DR|$  после 07 UT 1 апреля началось в связи с ростом напряженности южной компоненты ММП до  $\sim -21$  нТл в 16—20 UT. Максимальное развитие кольцевого тока приходится на 17—22 UT 01.04.1973. Фаза восстановления магнитной бури связана с поворотом  $B_z$  ММП к северу. В связи с поворотом  $B_z$  ММП к югу в 8—9 UT  $|DR|$  снова возрастает. Спад  $DR$  к концу суток 2 апреля обусловлен новым поворотом  $B_z$  ММП к северу.

Модельные величины  $DR_m$  на рис. 1 в общих чертах соответствуют наблюдаемым  $DR_n$ . Это обусловлено тем, что функция инжекции  $F$  в уравнении баланса энергии для кольцевого тока контролируется  $B_z$ -компонентой ММП и, согласно

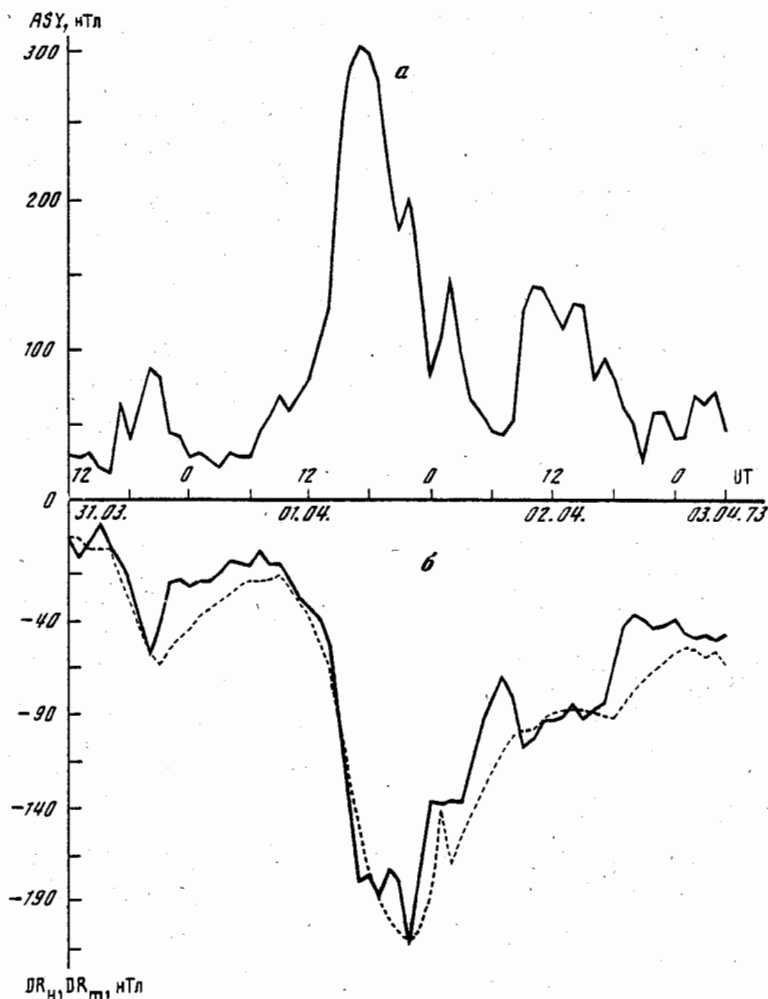


Рис. 1. Вариации долготной асимметрии магнитного поля на экваторе ASY (а) и магнитного поля кольцевого тока DR (б); сплошная линия – наблюдаемые значения DR<sub>н</sub>, штриховая – модельные DR<sub>м</sub> по [2]

[2], определяется из соотношения:

$$F = 8,2 \cdot 10^{-3} V (B_z - 0,67\sigma) - 14,1 (V - 300) + 9,4,$$

где  $F$  в нТл/ч,  $V$  в км/с,  $B_z$  и дисперсия ММП  $\sigma$  в нТл.

DR<sub>м</sub> хорошо согласуется с DR<sub>н</sub> на фазе усиления кольцевого тока и более плавно уменьшается на фазе восстановления. Лучшего согласия DR<sub>н</sub> и DR<sub>м</sub> можно было бы достигнуть для данной бури, уменьшив принятые для  $\tau_{ф.в}$  значения с  $\sim 9-10$  ч до  $\tau_{ф.в} \sim 6$  ч. На главной фазе бури модельные значения  $\tau_{г.ф} \sim 3-4$  ч при наблюдаемых значениях  $F \sim (2-8) \cdot 10^{18}$  эрг/с хорошо описывают вариации DR<sub>н</sub>. При принятых, согласно модели [2], значениях  $\tau$  коэффициент корреляции  $r$  между DR<sub>н</sub> и DR<sub>м</sub> равен 0,96, а среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ) равно 19,9 нТл, что находится на уровне значений  $\sigma$  по большому числу бурь для модели кольцевого тока по [2].

3. Долготная асимметрия вариаций магнитного поля (ASY) приведена в верхней части рис. 1. 31 марта ASY возрастает вместе с интенсивностью DR, достигая в экстремуме в 20 UT примерно тех же значений. На главной фазе бури ASY рас-

тет в опережающем темпе относительно DR и ее максимальное значение  $\sim 300$  нТл в 17–19 UT 1 апреля в  $\sim 1,5$  раза превышает  $|DR|_H$ . Спад ASY начинается в интервале экстремальных интенсивностей  $DR_H$  (19–22 UT 1 апреля) и происходит более стремительно. Таким образом, уменьшение асимметрии начинается еще в период развитого кольцевого тока и, следовательно, асимметрия более чувствительна к вариациям  $B_z$ -компоненты ММП, чем  $DR_H$ . Об этом же свидетельствует экстремум в ASY в 02 UT 2 апреля, который отражает кратковременный поворот  $B_z$  к югу в 01 UT, проявляющийся в вариациях  $DR_H$  только в виде задержки спада. С 02 до 07 UT 2 апреля  $B_z$  направлено к северу,  $DR_H$  и ASY спадают, причем  $DR_H$  более медленно, оставаясь на уровне  $\leq -100$  нТл, в то время как ASY уменьшается до  $\sim 40$  нТл. С 07 UT 2 апреля начинается усиление  $DR_H$  и ASY до  $-130$  и  $140$  нТл соответственно, а с 10 до 17 UT происходит плавное уменьшение интенсивности кольцевого тока, сменяющееся резким скачком и последующим колебанием  $DR_H$  около  $-64 \pm 3$  нТл. ASY начинает быстро уменьшаться после 10 UT, уменьшение скачком происходит в 15 UT и к концу суток ASY 60 нТл. По-видимому, ASY является более чувствительным индикатором воздействия ММП на процессы в магнитосфере, нарастая быстрее, чем  $|DR_H|$  в главной фазе бури, и уменьшаясь на фазе восстановления.

Минимальные значения  $DR_H$  приходятся, как правило, на вечерние-предполуночные, максимальные – на утренние часы местного геомагнитного времени. Так, в конце суток 31 марта 1973 г. в 19–21 UT развитие кольцевого тока происходило с экстремальным понижением поля низкоширотной obs. Таманрассет (20–22 MLT) и экстремальным повышением на obs. Какиока, Алибаг и Багуио ( $\sim 2 - 4$  MLT). В интервал экстремальных понижений поля на главной фазе магнитной бури 1 апреля в 17–20 UT минимальные значения DR наблюдались на obs. Таманрассет (18–21 MLT), а экстремально повышенные – на obs. Какиока и Гонолулу (2–7 MLT).

На рис. 2 приведены зависимости ASY от геоэффективных параметров солнечного ветра  $E = VB_z$ ,  $\epsilon$  и  $F$  на главной фазе магнитной бури с 07 до 22 UT 1 апреля 1973 г. Видно, что ASY растет с увеличением потока вводимой в магнитосферу или кольцевой ток энергии. В конце главной фазы при высоких значениях всех трех геоэффективных параметров солнечного ветра асимметрия начинает уменьшаться. Таким образом, уменьшение асимметрии начинается при экстремальных значениях интенсивности кольцевого тока при еще высоких значениях скорости поступления энергии внутрь магнитосферы. Соответствующие уравнения линейной регрессии и коэффициентов корреляции  $r$  имеют вид:

$$ASY = (-25 \pm 3)(VB_z) + (28 \pm 19), \quad r = 0,92 \pm 0,04,$$

$$ASY = (5 \pm 1)\epsilon + (34 \pm 23), \quad r = 0,87 \pm 0,06,$$

$$ASY = (-27 \pm 3)F + (33,5 \pm 18), \quad r = 0,92 \pm 0,04.$$

Здесь ASY в нТл,  $VB_z$  в мВ/м;  $\epsilon$  и  $F$  в единицах  $10^{18}$  эрг/с. Все три геоэффективных параметра солнечного ветра контролируют развитие ASY геомагнитного поля на экваторе в главную фазу магнитной бури, наилучшая корреляция ASY с  $E$  и  $F$ .

4. На низкоширотных обсерваториях основной вклад в вариации геомагнитного поля во время магнитной бури вносит кольцевой ток. При моделировании вариаций магнитного поля на конкретных обсерваториях во время магнитных бурь необходимо учитывать также магнитное поле трехмерных токовых систем, втекающих и вытекающих вдоль силовых линий из ионосферы высоких широт, а также растекающихся по ионосфере. По-видимому, такие токовые системы ответственны за основную часть асимметрии магнитного поля на поверхности Земли в период возмущений [4]. Ниже проведено сопоставление модельных и наблюдаемых вариаций геомагнитного поля на среднеширотной obs. Нимегк

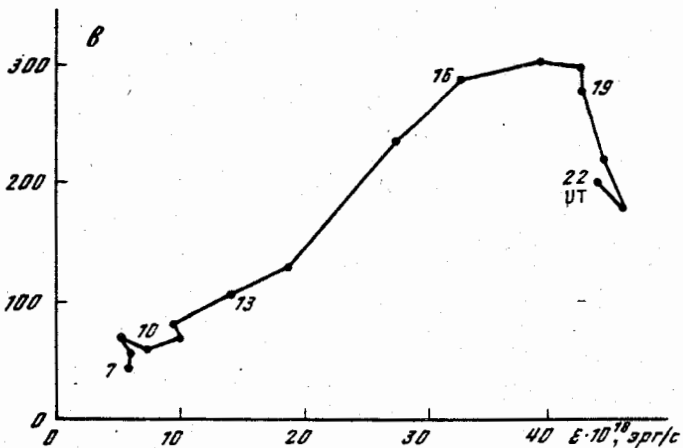
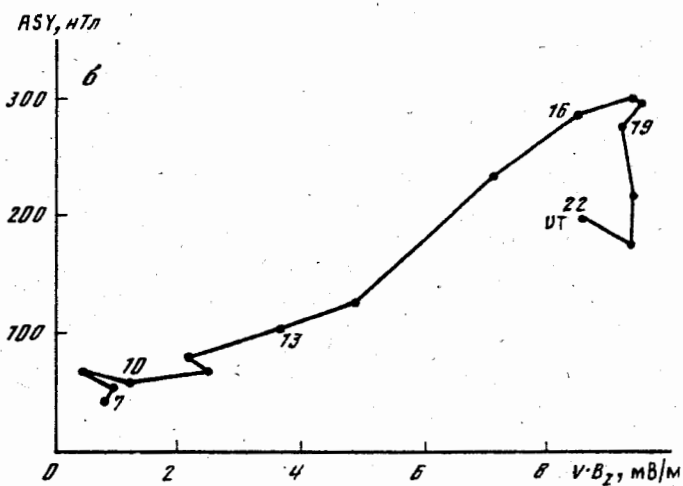
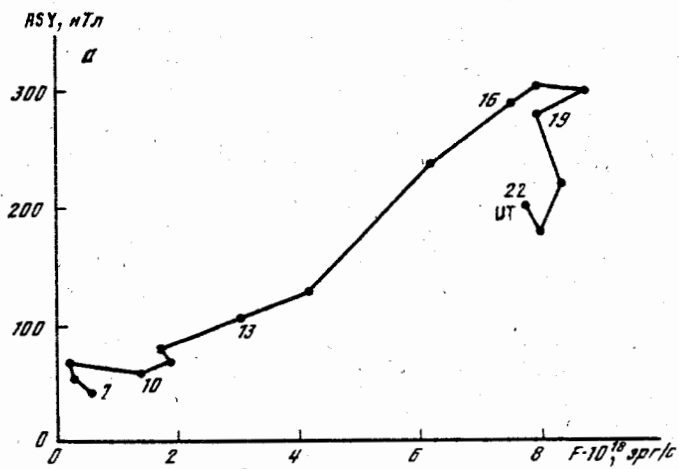


Рис. 2. Асимметрия магнитного поля на экваторе в главную фазу магнитной бури 01.04.1973 г. в зависимости от геоэффективных параметров солнечного ветра, которые опережают ASY на 1 ч; цифры на кривых – время в UT

( $\Phi = 48^\circ$ ) и низкоширотной обс. Тбилиси ( $\Phi = 37^\circ$ ) с учетом как полей кольцевого тока, так и трехмерных токовых систем.

Из вариаций горизонтальных компонент в обс. Нимегк и Тбилиси были исключены спокойные солнечно-суточные вариации (за 12 апреля 1978 г.). Полученные вариации сопоставлялись с модельными, рассчитанными как сумма полей DCF,  $DR_M$  и  $ASY_M$ . Поля DCF и  $DR_M$  на поверхности Земли на экваторе контролируются параметрами межпланетной среды и рассчитываются по моделям [2, 5], а затем пересчитываются на широту соответствующей обсерватории. Модельное значение  $ASY_M$  связывается в настоящей работе с магнитным эффектом высокоширотных трехмерных токовых систем. Для их расчета использовалась модель ИЗМИРАН [6]. Эта модель позволяет определить величины ионосферных и продольных токов во всей области высоких широт  $\Phi' \geq 60^\circ$  при известных значениях  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП. При заданном распределении токов трехмерной системы магнитное возмущение в любой точке на земной поверхности рассчитывается по закону Био-Савара. Для наших целей модель ИЗМИРАН для сезона равноденствия модифицировалась смещением центра ионосферной токовой струи высокоширотной системы токов к экватору. Величина смещения зависит от интенсивности кольцевого тока на экваторе  $DR_{H\alpha}$  и вычислялась по соотношению, приведенному в [7].

На рис. 3 представлены полученные описанным выше способом модельные вариации геомагнитного поля 31 марта – 3 апреля 1973 г. от кольцевого и продольных токов в сравнении с наблюдаемыми значениями  $\Delta X_g$  компоненты на обс. Тбилиси (рис. 3а) и Нимегк (рис. 3б) соответственно. В обс. Тбилиси модель описывает понижения поля в 20–24 UT 31 марта и в 12–24 UT 1 апреля. Сглаживается характерное понижение в DR в 8–12 UT 2 апреля. Время экстремальных понижений поля в главную фазу бури по модели достаточно хорошо согласуется с наблюдениями. В обс. Нимегк модельные значения вариаций поля в экстремуме несколько меньше наблюдаемых при хорошем совпадении во времени. Подobie двух кривых характеризуется коэффициентами корреляции  $r_T = 0,87$  и  $r_H = 0,83$  и среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_T = 27$  нТл и  $\sigma_H = 35$  нТл соответственно для обс. Тбилиси и Нимегк. Удовлетворительное описание модельными вычислениями наблюдаемых вариаций геомагнитного поля свидетельствует о заметном вкладе высокоширотных токовых систем во время магнитных бурь как на низких, так и средних широтах.

Приведенные выше результаты подтверждают выводы о существенном вкладе высокоширотных токовых систем в создании асимметрии возмущенного поля на поверхности Земли (см., например, [8]). Так как интенсивность кольцевого тока и трехмерных токовых систем тесно связаны с параметрами межпланетной среды, то существует возможность прогнозировать не только вариации магнитного поля кольцевого тока, но и вариации поля на конкретных магнитных обсерваториях во время магнитных бурь.

5. Взаимосвязь между индексами геомагнитной активности и параметрами солнечного ветра может быть исследована методом линейной фильтрации [9, 10]. Предполагается, что магнитосфера откликается как линейная система на воздействие межпланетной среды. Постоянные коэффициенты этой линейной системы определяются из решения интегрального уравнения

$$m(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) n(t - \tau) d\tau,$$

где  $m(t)$  – выходная функция,  $h(t - \tau)$  – входная функция,  $h(\tau)$  – импульсная функция связи. Функция  $h(\tau)$  вычисляется по известным значениям  $n(t)$  и  $m(t)$  исходя из критерия минимума среднеквадратичного отклонения. Ниже в качестве входной функции использовались ежечасные значения геоэффективных параметров солнечного ветра  $\epsilon$ ,  $F$  и  $E$ , выходной функции – индексы геомагнитной активности AE и DR за интервал с 07 UT 01.04 – 07 UT 02.04.1973. Этот

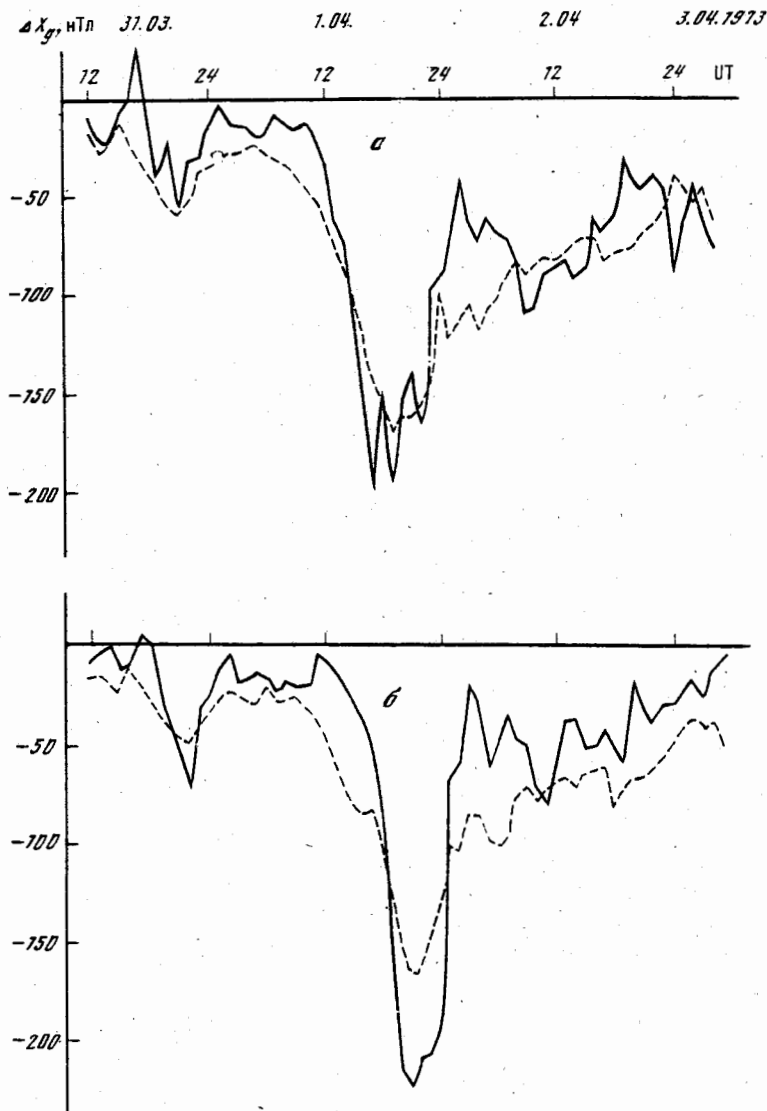


Рис. 3. Модельные (пунктир) и наблюдаемые (сплошная линия) вариации геомагнитного поля на поверхности Земли на обс. Тбилиси (а) и Нимегк (б) за 31 марта – 3 апреля 1973 г.

интервал соответствует главной фазе и начальной стадии фазы восстановления изучаемой бури.

На рис. 4 приведены рассчитанные значения  $h(\tau)$ . Для авроральной активности (рис. 4а)  $h(\tau)$  для индексов  $\epsilon$ ,  $F$  и  $E$  подобны (обращение характера кривых обусловлено различием в знаках, ибо  $\epsilon > 0$  а  $E$  и  $F < 0$ ): после основного экстремума на первом-втором часе происходит резкое уменьшение  $|h|$ . Это означает, что основной вклад в индекс АЕ данной бури вносит зависимость от параметров межпланетной среды в данный и предшествующий часы. Последующая зависимость от  $\tau$  носит колебательный характер с периодом в несколько часов и с уменьшающейся амплитудой. Экстремумы на десятом и семнадцатом часе вряд ли имеют физический смысл. Изменение временного интервала, взятого для определения  $h(\tau)$  (например, с 12 UT 1 апреля до 12 UT 2 апреля) несколько деформирует кривую  $h(\tau)$ : при сохранении основного экстремума на  $\tau =$

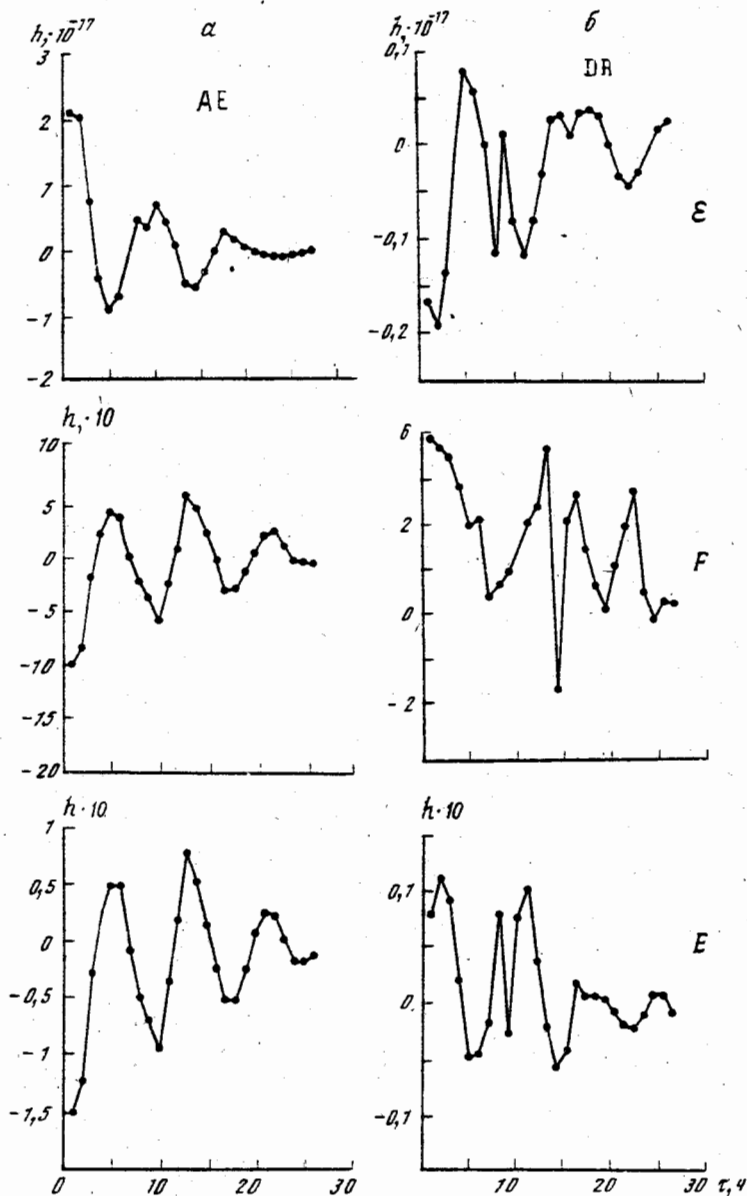


Рис. 4. Импульсные функции связи  $h(\tau)$  для индексов AE (а) и DR (б); входные функции:  $\epsilon$ , F, E

$= 1 - 2$  ч резко уменьшаются экстремумы на  $\tau = 10$  и  $\tau = 17$  ч и вся кривая  $h(\tau)$  после резкого спада  $h(\tau)$  на  $\tau = 2$  ч становится очень иррегулярной. По-видимому, обнаруженный в [11] слабый дополнительный экстремум на  $\tau = 5$  ч связан с таким иррегулярным характером кривой  $h(\tau)$  и не имеет физического смысла.

Для кольцевого тока (рис. 4б) кривые  $h(\tau)$  после экстремума на  $\tau = 2$  ч носят более иррегулярный характер, чем кривые  $h(\tau)$  для AE-индекса. Для различных геоэффективных параметров солнечного ветра меняется характер кривых и количество экстремумов. Это свидетельствует о менее тесной связи DR с параметрами солнечного ветра. По-видимому, менее тесная связь обусловила и медленный спад  $h(\tau)$  для DR-индекса после экстремума на  $\tau = 2-3$  ч и дополнительный слабый экстремум на  $\tau = 6$  ч в [11]. Различный характер связи AE- и DR-индексов

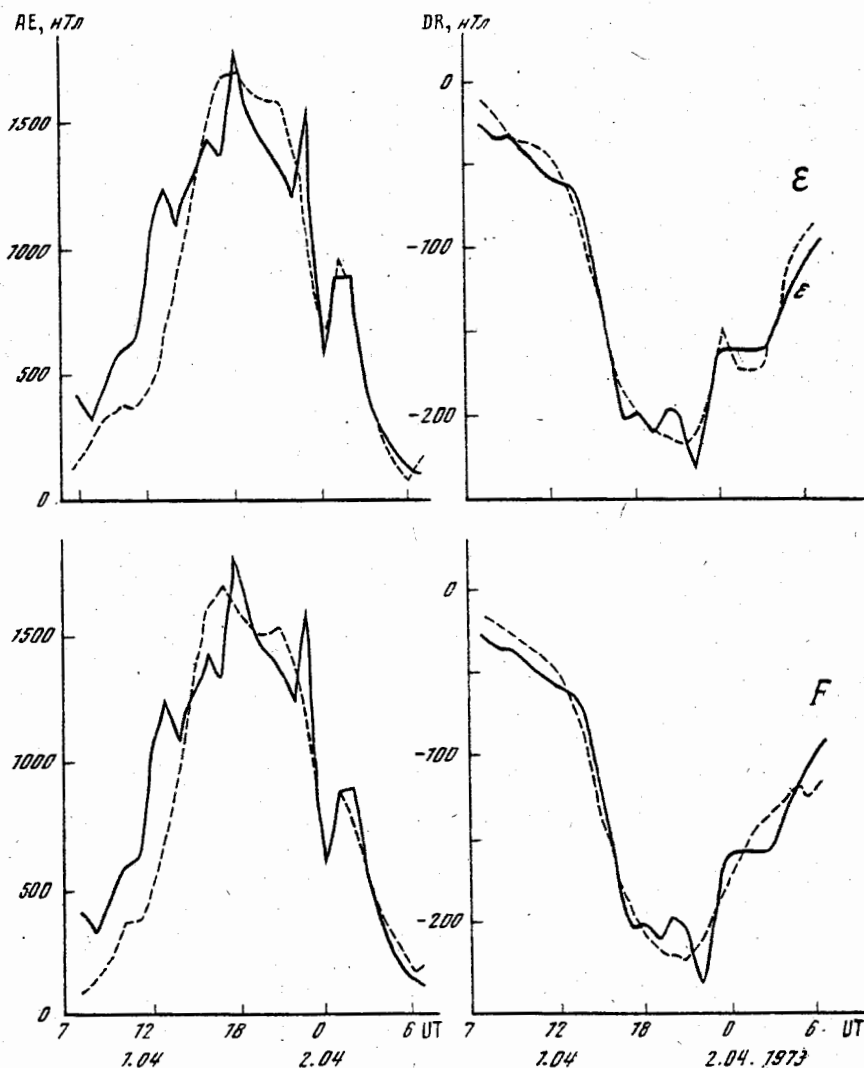


Рис. 5. Наблюдаемые (сплошная линия) и рассчитанные (штриховая) значения индексов магнитной активности для интервала 07 UT 01.04 – 07 UT 02.04. 1973 г.

с геоэффективными параметрами солнечного ветра обусловлен тем, что  $\epsilon$ ,  $F$  и  $E$  обуславливают не саму величину  $DR$ , а ее изменения [12]. В то же время индекс  $AE$  непосредственно контролируется параметрами солнечного ветра. Однако определенные выше значения  $h(\tau)$  позволяют достаточно точно воспроизвести наблюдаемые вариации  $AE_n$  и  $DR_n$ . На рис. 5 приведены наблюдаемые (сплошная линия) и вычисленные (штриховая) значения  $AE$  и  $DR$  для интервала 07 UT 01.04 – 07 UT 02.04. 1973. Видно, что вычисленные вариации описывают результаты наблюдений, за исключением начального интервала, где вычисленные значения занижены. Это означает, что для точного описания индексов активности необходимо использовать данные о параметрах солнечного ветра за несколько предшествующих часов.

**6. Выводы.** Модель [2] вариаций магнитного поля кольцевого тока на поверхности Земли при принятых значениях функции инжекции  $F$  и параметре распада кольцевого тока  $\tau$  хорошо описывает наблюдаемые вариации  $DR_n$  в течение интенсивной магнитной бури 31 марта – 3 апреля 1973 г.



Показано, что асимметрия кольцевого тока является чувствительным индикатором воздействия межпланетной среды на процессы в магнитосфере Земли. Асимметрия нарастает быстрее, чем  $|DR_H|$  в главной фазе бури и также быстрее уменьшается на фазе восстановления. Интенсивность ASY находится в тесной связи с потоком энергии, поступающей в магнитосферу из солнечного ветра.

Установленное достаточно хорошее соответствие между модельными и наблюдаемыми вариациями геомагнитного поля на конкретных обсерваториях свидетельствует, что:

а) долготная асимметрия наблюдаемых на поверхности Земли во время магнитных бурь вариаций поля обусловлена эффектами продольных токов;

б) вариации магнитного поля на средних и низких широтах во время бури могут быть описаны на основе современных модельных представлений о структуре поля вариаций. Составляющие этой структуры контролируются параметрами межпланетной среды.

Используя данные о параметрах межпланетной среды, основная часть геомагнитных возмущений может быть рассчитана в предположении, что магнитосфера функционирует как линейная система. Вычисленные методом линейной фильтрации функции импульсивной связи индекса авроральной активности и кольцевого тока с геоэффективными параметрами межпланетной среды получаются несколько различными. Эти различия обусловлены, по-видимому, характером взаимосвязи AE и DR с  $\epsilon$ , F и E: непосредственной взаимосвязью с величиной AE и с изменениями величины DR.

Работа выполнена при финансовой поддержке Немецкого Научного Общества по проекту MASRAEL.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feldstein Y.I.* Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium // Space Sci. Rev. 1992. V. 59. P. 83.
2. *Pisarsky V. Yu., Feldstein Y.I., Rudneva N.M., Prigansova A.* Ring current and interplanetary medium parameters // Stadia Geoph. et Geodet. 1989. V. 33. P. 61.
3. *King J.H.* Interplanetary medium data book // NSSDC for Rockets and Satellites, WDCA, Goddard Space Flight Center, USA, 1974.
4. *Kamide Y., Fukushima N.* Analysis of magnetic storms with DR-indices for equatorial ring current field // Rep. Ionosph. Space Res. Jap. 1971. V. 25. P. 125.
5. *Mead G.D.* Deformation of the geomagnetic field by the solar wind // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 1181.
6. *Левитин А.Е., Фельдштейн Я.И., Афонина Р.Г. и др.* Модель крупномасштабных электрических полей и токов в ионосфере высоких широт // М.: Гидрометеониздат, 1984. 1024 с.
7. *Сумарук П.В., Фельдштейн Я.И., Белов Б.А.* Динамика магнитосферной активности в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавтика. 1989. Т. 29. С. 110.
8. *Sun W., Ahn B.H., Akasofu S.-I., Kamide Y.* A comparison of the observed mid-latitude magnetic disturbance fields with those reproduced from the high-latitude modelling current system // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 10881.
9. *Iemori T., Maeda H., Kamei T.* Impulse response of geomagnetic indices to interplanetary magnetic field // J. Geomag. Geoelectr. 1979. V. 31. P. 1.
10. *Baker D.N., Bargatze L.F., Zwickl R.D.* Magnetospheric response to the IMF. Substorms // J. Geomag. Geoelectr. 1986. V. 38. P. 1047.
11. *Iemori T., Maeda H.* Prediction of geomagnetic activities from solar wind parameters based on the linear prediction theory // Solar-Terrestrial Predictions Proceedings / Ed. Donnelly R.F. NOAA, ERL, 1980. V. 4. P. A-1.
12. *Сумарук П.В., Фельдштейн Я.И., Белов Б.А.* Зависимость интенсивности авроральных электроструй и кольцевого тока от геоэффективных параметров межпланетной среды // Геомагнетизм и аэронавтика. 1990. Т. 30. С. 195.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн РАН  
Институт Геофизики, Тбилиси, Грузия  
Центр Наук о Земле, Потсдам, Германия

Поступила в редакцию  
24.12.92  
После доработки  
22.03.93