

УДК 550.388

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОГОДА НАД ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРОЙ ВО ВРЕМЯ ПОЛЯРНОГО СИЯНИЯ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

© 1995 г. Я. И. Фельдштейн\*, А. Е. Левитин\*, Л. И. Громова\*,  
Г. Т. Марклунд\*\*, Л. Г. Бломберг\*\*, П.-А. Линдквист\*\*

\*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк

\*\*Альвеновская лаборатория, Королевский технологический институт, Швеция

Поступила в редакцию 20.07.94 г.

Сопоставлены модельные расчеты электромагнитной погоды над высокоширотной ионосферой (пространственно-временных распределений электростатического потенциала и электрического поля) с измерениями электрического поля на спутнике Викинг 3. VIII. 1986 г., когда в полярной шапке существовала широкая полоса яркого аврорального свечения (тета-сияние). При расчетах использовался переменный временной сдвиг от 10 до 30 мин между измерениями компонентов межпланетного магнитного поля на спутнике ИМП-8 в солнечном ветре и электрического поля на Викинге. Наилучшее согласие наблюдаемых и модельных значений поля получено при временном сдвиге ~20 мин (коэффициент корреляции  $r = 0.88 \pm 0.07$ ). Хорошее согласие вдоль траектории Викинга между модельными и наблюдаемыми значениями электрического поля позволяет полагать, что модель может быть использована для описания временных вариаций конвекции плазмы и электрического поля во всей области высоких широт. Показано, что характер крупномасштабной конвекции существенно изменяется за время жизни тета-сияния.

Широкий круг геофизических явлений, происходивших 3.VIII. 1986 г. в ионосферно-магнитосферной системе, и их взаимосвязь с вариациями параметров межпланетной среды, обсуждался в литературе. В [1] исследовалась сопряженность полос ярких полярных сияний в двух полярных шапках (Θ-сияния) по одновременным изображениям свечения, полученным со спутников в северном (Викинг) и в южном (Дайнемикс Эксплорер-1) полушариях. Было найдено, что полосы расположены симметрично на противоположных сторонах от меридиана 01 - 13 ч местного геомагнитного времени (MLT). Вариации магнитного поля вдоль траектории Викинга интерпретировались в [2] в рамках пересечения трехмерной токовой системы, связывающей ионосферу с магнитосферой, и в связи с вариациями давления солнечного ветра на магнитопаузе. В [3] сопоставлялось расположение Θ-сияний по снимкам аврорального свечения в ультрафиолете с борта DE-1 и по наземным оптическим наблюдениям камерой полного обзора небосвода вблизи геомагнитного полюса. Динамика Θ-сияния в полярной шапке южного полушария исследовалась 3.VIII. 1986 г. в интервале 15 - 20 UT по аскафильмам станции "Восток" и изображениям DE-1 в ультрафиолете в связи с вариациями межпланетного магнитного поля (ММП).

Цель данной статьи – описание крупномасштабной конвекции плазмы и распределения век-

тора электрического поля на высотах авроральной ионосферы, а так же их временных вариаций во время пересечения спутником Викинг области высоких широт 3.VIII. 1986 г. на пролете № 896.

Событие 3.VIII. 1986 г. представляет особый интерес для изучения электродинамики магнитосферы в период появления Θ-сияний. Обычно такой тип аврорального свечения существует при северной ориентации ММП ( $B_z > 0$ ), когда на дневной стороне полярной шапки на высотах ионосферы конвекция направлена к Солнцу. 3.VIII интенсивные полярные дуги существовали в течение длительного интервала времени при  $B_z < 0$  и, следовательно, возможен другой характер магнитосферной конвекции. Выяснение расположения Θ-сияния относительно необычной для таких интервалов крупномасштабной конвекции в полярной шапке может оказаться полезным при создании модели этого геофизического явления, описывающей не только наиболее характерные ситуации.

Аналогично движению масс воздуха около Земли в пограничном слое атмосферы, которое обуславливает обычную погоду, перенос ионосферной плазмы (конвекция) определяет электромагнитную погоду в ближнем космосе и ее изменения. В отличие от нейтрального газа в тропосфере, чье движение контролируется градиентами атмосферного давления и другими механическими силами, движение плазмы в верх-

ней атмосфере определяется (по величине и направлению) электрическими полями. Эти поля переносятся на ионосферные высоты из магнитосферы с помощью продольных электрических токов. Крупномасштабное распределение перечисленных выше электромагнитных параметров околоземного пространства (конвекция, электрическое поле, продольные и ионосферные токи) определяется ниже термином электромагнитная погода в ионосфере. Первый раздел содержит краткое описание модели, используемой для расчетов электромагнитных параметров околоземной среды, и аппаратуры для измерения поперечной составляющей вектора электрического поля, размещенной на Викинге. Результаты модельных расчетов напряженности электрических полей вдоль траектории Викинга сопоставляются с экспериментальными данными во втором разделе. Последний раздел включает обсуждение полученных результатов и выводы данного исследования.

МОДЕЛЬ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Крупномасштабное распределение конвекции над ионосферой представляется изолиниями электростатического потенциала  $\Phi$  (изопотенциалами). Ниже использована модель [4], в которой значения  $\Phi$  получены в результате численного интегрирования дифференциального уравнения второго порядка в частных производных при известной токовой функции  $\Psi$ .

В случае неоднородной проводимости ионосферы это уравнение имеет вид

$$\begin{aligned}
 &-\frac{1}{\tau} \left[ (\tau \Sigma_x \Phi_\theta)_\theta + \frac{1}{\tau} (\Sigma_x \Phi_\Lambda)_\Lambda \right] + \\
 &+ \frac{1}{\tau} [ (\Sigma_n \Phi_\Lambda)_\theta - (\Sigma_n \Phi_\theta)_\Lambda ] = \\
 &= \frac{1}{\tau} (\tau \Psi_\theta)_\theta - \frac{1}{\tau^2} \Psi_{\Lambda\Lambda}
 \end{aligned} \tag{1}$$

с граничным условием

$$\Phi = 0 \text{ на } \theta = 34^\circ. \tag{2}$$

Здесь  $\theta$  и  $\Lambda$  в сферических координатах обозначают соответственно кошироту и долготу,  $\Sigma_x$  и  $\Sigma_n$  — интегральные значения холловского и педерсеновского компонентов тензора ионосферной проводимости,  $\tau = \sin \theta$ .  $\Sigma_x$  и  $\Sigma_n$  слагаются из проводимостей, обусловленных как солнечной волновой радиацией, так и вторжением плазмы авроральных энергий.

Токовая функция  $\Psi$  связана с вариацией горизонтальных компонентов магнитного поля на поверхности Земли.  $\Psi$  определяется из пространственно-временного распределения вариаций геомагнитного поля, измеряемых на поверхности

Земли планетарной сетью магнитометров, для различных уровней магнитной возмущенности.

Используя регрессионный метод, были выделены различные типы высокоширотных вариаций геомагнитного поля, контролируемые компонентами ММП и параметрами плазмы солнечного ветра. Регрессионный анализ позволяет связать количественно компоненты ММП и параметры плазмы солнечного ветра с составляющими магнитного поля на поверхности Земли. Согласно [5], горизонтальный и вертикальный компоненты вариации магнитного поля на поверхности Земли в высоких широтах (выше  $60^\circ$ ) могут быть описаны рядом

$$\begin{aligned}
 H_E^i = &K_i^{B_y} B_y + K_i^{B_z} B_z + K_i^{B_x} B_x + \\
 &+ K_i^{n v^2} n \left( \frac{v}{100} \right)^2 + K_i^{v^2} \left( \frac{v}{100} \right)^2 + H_0^i,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $B_y$ ,  $B_z$  и  $B_x$  — компоненты ММП,  $n$  и  $v$  — соответственно плотность и скорость солнечного ветра. Предполагается, что такой ряд достаточно точно описывает характерные особенности вариаций геомагнитного поля для квазистационарных процессов в земной магнитосфере как функцию состояния межпланетной среды. Коэффициенты  $K_i$  находятся методом наименьших квадратов из условия минимальных отклонений наблюдаемых значений векторов вариаций геомагнитного поля и определяемых по соотношению (3) для различных значений компонентов ММП,  $n$  и  $v$ . Каждый член ряда (3) представляет вариацию геомагнитного поля, контролируемую определенным параметром межпланетной среды, а остаточный член  $H_0^i$  получается экстраполяцией среднеширотной  $S_q$  токовой системы в высокоширотную область ( $S_q$  — токовая система вариаций геомагнитного поля по международным спокойным дням). Детальное описание определения коэффициентов  $K_i$  методом наименьших квадратов для каждого часа UT и для каждой обсерватории дано в [5]. Коэффициенты  $K_i^{B_x}$  много меньше, чем  $K_i^{B_y}$  и  $K_i^{B_z}$ , а зависящие от  $n$  и  $v$  члены в (3) можно объединить с

$H_0^i$  в одну константу  $H_0 = K_i^{n v^2} n v \left( \frac{v}{100} \right)^2 + K_i^{v^2} \left( \frac{v}{100} \right)^2 + H_0^i$ , представляющую средние условия в солнечном ветре ( $n = 4$  частицы/см<sup>3</sup> и  $v = 500$  км/с). В результате вариации магнитного поля представляются трехчленом

$$H_E^i = K_i^{B_y} B_y + K_i^{B_z} B_z + H_0. \tag{4}$$

Представление  $H_E^i$  в виде (3) следует использовать в случае экстремальных значений  $n$  и  $v$ .

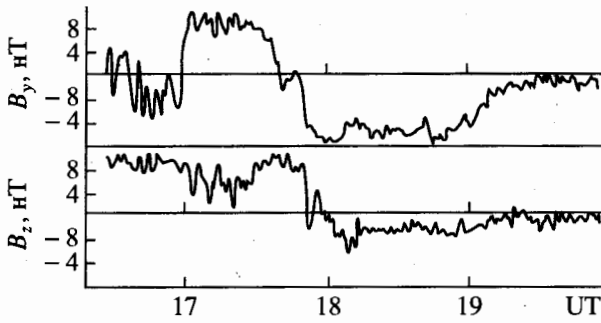


Рис. 1. Вариации  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП 3.VIII. 1986 г. по измерениям на спутнике ИПМ-8, включающие время пролета спутника Викинг между 17.10 и 19.25 UT через область высоких широт северного полушария [1].

Пространственно-временные распределения значений  $K_i^{B_y}$ ,  $K_i^{B_z}$  и  $H_0$  входят составной частью в модель [4]. Эта модель содержит также величины потенциалов  $\Phi_y^m$ ,  $\Phi_z^m$ ,  $\Phi_0^m$ , полученных численным решением уравнения (1) с граничным условием (2) и токовой функцией, определяемой по соответствующему набору коэффициентов  $K_i^{B_y}$ ,  $K_i^{B_z}$  и  $H_0$ .

Потенциал  $\Phi^m$  в точке ( $\varphi$ , MLT) вычисляется из соотношения

$$\Phi^m(\varphi, \text{MLT}, B_y, B_z) = \Phi_y^m(\varphi, \text{MLT})B_y + \Phi_z^m(\varphi, \text{MLT})B_z + \Phi_0^m(\varphi, \text{MLT}), \quad (5)$$

где  $B_y$  и  $B_z$  — компоненты вектора ММП для временного интервала определения  $\Phi$ ,  $\varphi$  — инвариантная широта, MLT — местное геомагнитное время. Корпускулярная часть интегральной проводимости ионосферы для условий  $B_z > 0$  и  $B_z \leq 0$  принималась, по [6], при индексе  $K_p < 3$  и  $K_p > 3$  соответственно. Распределения  $\Phi_y^m(\varphi, \text{MLT})$ ,  $\Phi_z^m(\varphi, \text{MLT})$  и  $\Phi_0^m(\varphi, \text{MLT})$  демонстрируют, как электростатический потенциал (а следовательно, и конвекция) в высокоширотной ионосфере реагируют соответственно на компоненты ММП ( $B_y = +1$  нТ,  $B_z = 0$ ), ( $B_y = 0$ ,  $B_z = +1$  нТ) и ( $B_y = B_z = 0$ ). В результате из (5) можно получить распределение  $\Phi^m(\varphi, \text{MLT}, B_y, B_z)$  для любой ориентации ММП.

Представление конвекции в ионосфере, по [5], в виде суммы элементарных составляющих  $\Phi_y^m$ ,  $\Phi_z^m$ ,  $\Phi_0^m$  согласуется с тремя типами (ячейками) магнитосферной конвекции, предложенными в [7, 8]. Их ячейки пересоединения эквивалентны  $\Phi_z^m$  для  $B_z < 0$ , вязкие ячейки эквивалентны  $\Phi_0^m$  для  $B_z = B_y = 0$ , ячейки долей хвоста магнито-

сферы эквивалентны  $\Phi_y^m$  и  $\Phi_z^m$  для  $B_z > 0$ . Так как  $\mathbf{E} = -\nabla\Phi$  (если  $\text{rot}\mathbf{E} = 0$ , что предполагается в данном исследовании), где  $\nabla$  — линейный дифференциальный оператор, то выражение, аналогичное (5), справедливо для значения электрического поля  $\mathbf{E}^m = -\nabla\Phi^m$ .

Аппаратура для измерения электрического поля на спутнике Викинг состоит из 6 сферических зондов, отнесенных на штанге от спутника [9]. Четыре штанги длиной в 40 м располагались в плоскости, перпендикулярной оси вращения спутника. Расположенные на них зонды давали информацию о двух компонентах электрического поля. Одна часто была почти параллельна силовой линии геомагнитного поля (компонент  $E_1$ ), а другая перпендикулярна  $\mathbf{V}$  и направлена почти противоположно вектору скорости спутника (компонент  $E_2$ ). Угол между компонентой  $E_2$  и вектором скорости спутника для пролета 3.VIII менялся в пределах от  $160^\circ$  до  $175^\circ$ . Информация относительно третьего компонента электрического поля отсутствует, так как один из зондов вышел из строя при запуске.

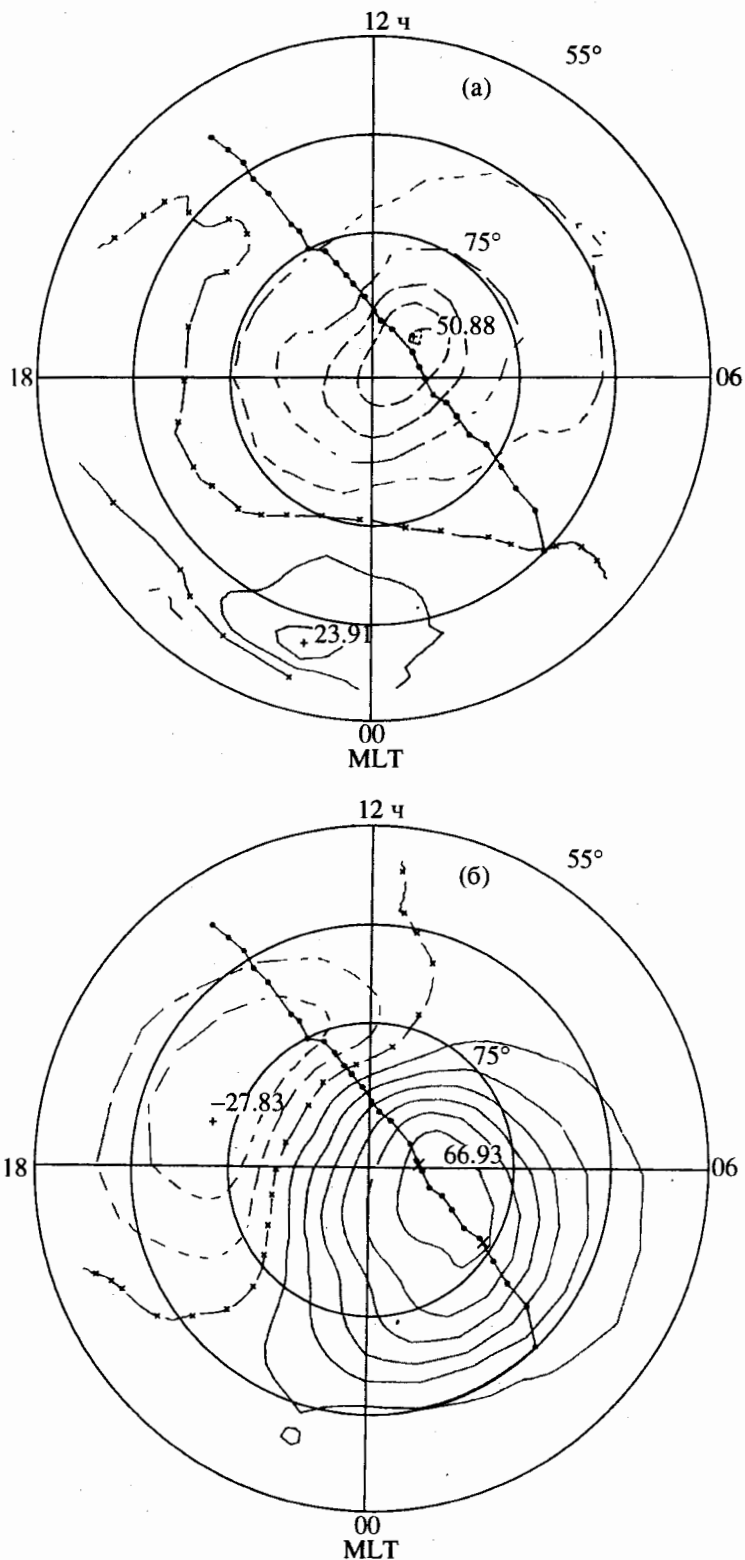
#### ВАРИАЦИИ КОНВЕКЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НАД ИОНОСФЕРОЙ 3.VIII. 1986 Г.

Параметры межпланетной среды в период пролета Викинга измерялись на спутнике ИПМ-8 [1]. На рис. 1 видны существенные изменения компонентов ММП за время пересечения Викингом высокоширотной области. В начале пролета  $B_z > 0$ ,  $B_y > 0$ , в конце пролета  $B_z < 0$ ,  $B_y < 0$ , устойчивый переход через нуль наблюдался в 17.50 в  $B_y$  и в 18.02 UT в  $B_z$  компоненте.

По наземным данным, после 18 UT зарегистрировано плавное увеличение интенсивности восточной и западной авроральных электроструй. Анализ глобального распределения векторов геомагнитных возмущений показывает, что это усиление активности предшествует фазе развития магнитосферной суббури, начавшейся в 20.15 UT. Переход к южной ориентации  $B_z$  компонента ММП, усиление магнитных возмущений в авроральной зоне дает основание полагать, что интервал между 18.02 UT и 20.15 UT соответствует фазе зарождения магнитосферной суббури.

На рис. 2 приведены два модельные распределения конвекции для разных  $B_z$  и  $B_y$ , соответствующих времени вхождения спутника в высокоширотную область на дневной стороне в 17.35 UT и расположения его над полярной шапкой в 18.20 UT. Результаты модельных расчетов показывают, что в интервале менее одного часа система магнитосферной конвекции кардинально меняется.

В начальной стадии пролета вся полярная шапка покрыта вихрем с конвекцией плазмы по



**Рис. 2.** Системы высокоширотной конвекции в северном полушарии в два момента времени, характеризующиеся различными значениями компонент ММП в координатах инвариантная широта – местное геомагнитное время. Изолинии потенциала проведены через 10 кВ, штриховая линия с крестиками – нулевой потенциал, в фокусах указаны максимальные значения потенциала. а –  $B_z = 10$  нТ,  $B_y = 6$  нТ в 17.35 UT; б –  $B_z = -4$  нТ,  $B_y = -10$  нТ в 18.20 UT.

Сплошные линии – конвекция против часовой стрелки, штриховые – по часовой. Сплошной линией с точками изображена проекция на высоту 100 км траектории спутника, точки соответствуют положению спутника через 5 мин. Крестиками на траектории на рис. 26 отмечены начало и конец регистрации на спутнике авроральных вторжений, связанных с  $\Theta$ -сиянием в 18.37 и 19.06 UT.

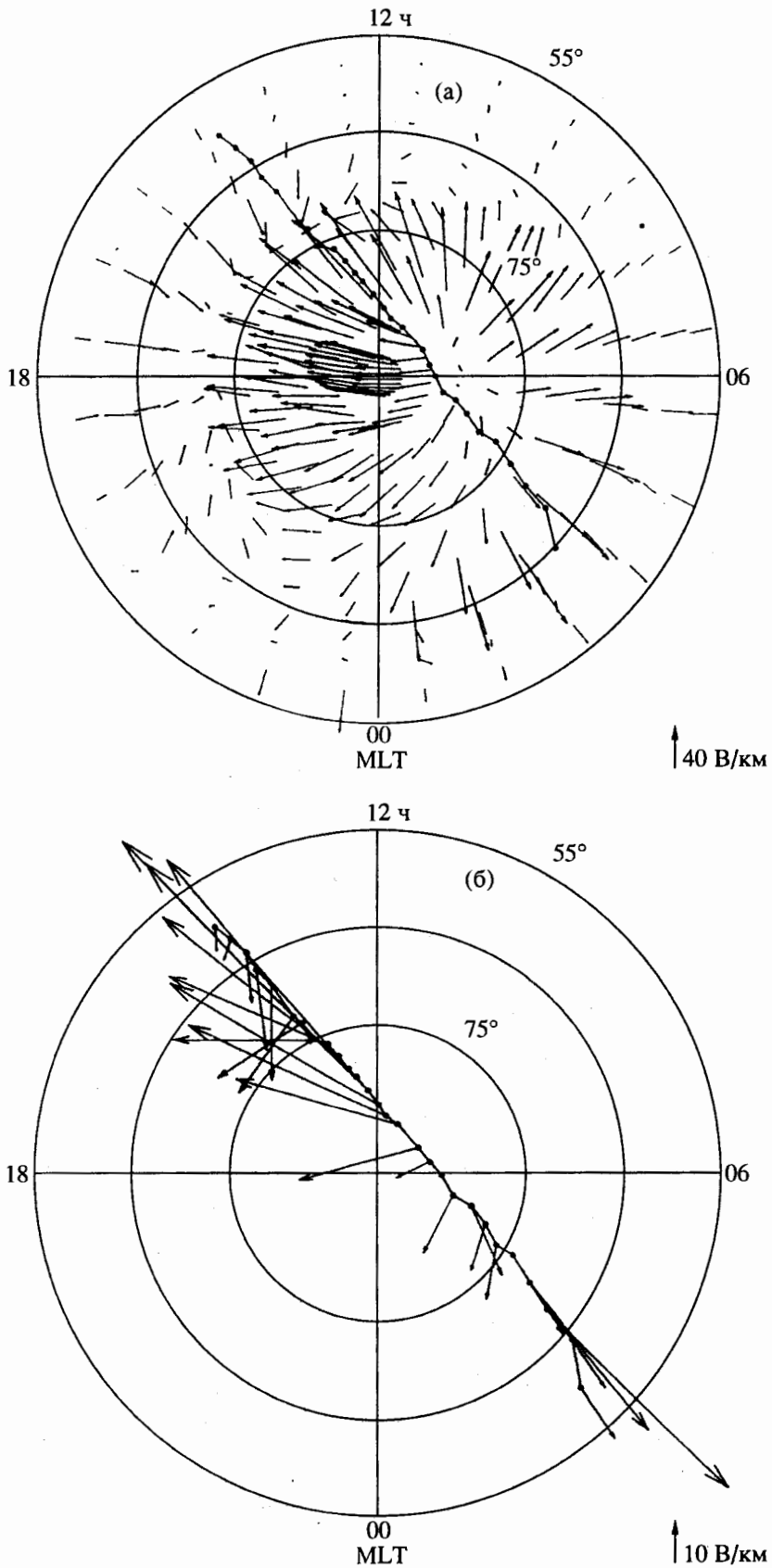


Рис. 3. Распределение векторов электрического поля для системы конвекции, изображенной на рис. 2б, для всей области высоких широт (а) и вдоль траектории Викинга через каждые 5 мин (б).

часовой стрелке. Такая система конвекции аналогична описанной ранее в [7, 10 - 12] для  $B_y > 0$ . Фокус полярного вихря располагается в районе геомагнитного полюса. Фокус второго вихря обычно располагается в вечернем секторе и смещен к полуденным часам. В дневном секторе полярной шапки конвекция направлена к Солнцу. После изменения направления ММП устанавливается двухвихревая система конвекции с антисолнечным течением в полярной шапке. Таким образом, в начале пролета Викинга движение плазмы в полярной шапке происходит по замкнутым траекториям на  $\phi \geq 75^\circ$ , а в середине пролета конвективный перенос плазмы в полярную шапку через дневной сектор происходит с авроральных и субавроральных широт. Этот перенос в околополуденном секторе происходит через район клефта (каспа), а затем через полярную шапку на ночную сторону.

На рис. 3а приведено пространственно-временное распределение векторов электрического поля, поперечных геомагнитным силовым линиям, соответствующих конвекции на рис. 2б. Модельные расчеты проведены для фиксированных значений  $B_z$  и  $B_y$  компонентов ММП. Полученное распределение электрического поля согласуется с обычно наблюдаемым для отрицательных значений  $B_z$  и  $B_y$  компонентов ММП. На широтах авроральной зоны электрическое поле направлено к экватору утром и к полюсу вечером. В полярной шапке электрическое поле направлено с утра на вечер, а в области дневного каспа к экватору. На рис. 3б приведены через интервал в 5 мин модельные значения векторов электрического поля вдоль траектории Викинга.

Выше отмечалось, что горизонтальный компонент электрического поля на Викинге измерялся в направлении примерно противоположном вектору скорости спутника. На рис. 4 приведены вариации проекции модельного электрического поля  $E^m$  на направление движения спутника. Отрицательные значения  $E^m$  соответствуют направлению электрического поля вдоль направления движения спутника [13]. Из сопоставления приведенных на рис. 4 величин  $E^m$  вдоль траектории спутника следует их существенное различие при изменении наблюдаемых компонентов ММП. Если ММП сохранит свое первоначальное значение  $B_z = 10$  нТ,  $B_y = 6$  нТ в течение всего пролета, то  $E^m$  будет отрицательным до 18.20 UT с экстремальной отрицательной величиной  $-44$  мВ/м в 18.05 UT (рис. 4а). Затем  $E^m$  останется положительным до конца пролета. Если же ММП в течение всего интервала представляется значением  $B_z = -4$  нТ,  $B_y = -10$  нТ, которое характеризует поле ближе к концу пролета, то  $E^m$  достигнет максимального значения в  $77$  мВ/м в 18.05 UT и станет отрицательным после 18.45 UT. Следовательно, вариации

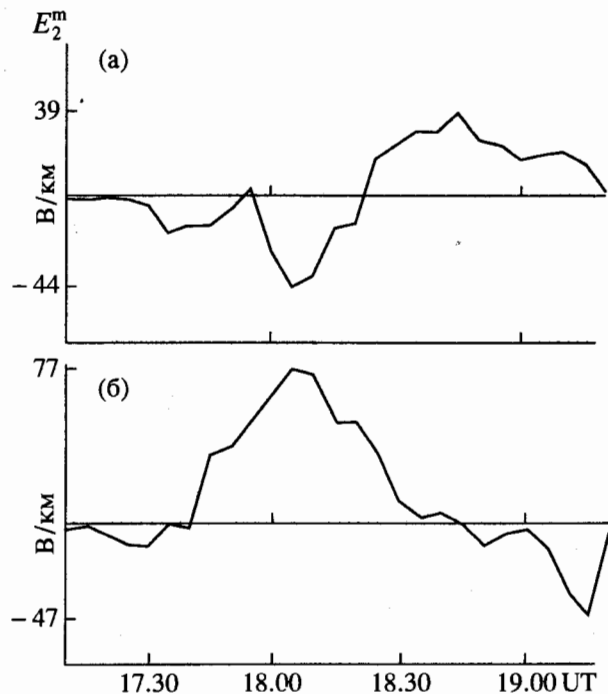


Рис. 4. Модельные значения электрического поля  $E_2^m$ , спроектированные на направление движения спутника, вычисленные для величин ММП: а - в 17.35 UT ( $B_z = 10$  нТ,  $B_y = 6$  нТ); б - в 18.20 UT ( $B_z = -4$  нТ,  $B_y = -10$  нТ).

ции модельных электрических полей вдоль траектории спутника существенно различны для величин ММП, наблюдаемых в начале и конце пролета Викинга. Эти результаты демонстрируют необходимость при модельных вычислениях электромагнитных параметров учитывать временные вариации в межпланетной среде в течение пролета спутника.

Такие временные вариации учитывались в модельных расчетах изменений электрического поля вдоль пролета Викинга, изображенных на рис. 5. Для этого распределение  $E^m$  вычислялось с шагом в 5 мин для всей высокоширотной области и для каждой точки вдоль орбиты спутника. Векторы электрического поля для соответствующего расположения спутника вдоль траектории и момента UT приведены на рис. 5а. Принимались 10 мин запаздывания между вариациями в ММП и их откликом в электрическом поле. На рис. 5б приведены вариации компонента  $E^m$  вдоль пролета с шагом в 5 мин в проекции на направление движения спутника. Значения  $E^m$  на рис. 5б, где учтены вариации компонентов ММП в течение пролета, существенно отличаются от приведенных на рис. 4. Вариация электрического поля характеризуется резким увеличением  $E^m$  на широтах дневного каспа между 18.00 и 18.10 UT, примерно нулевыми значениями в полярной шапке

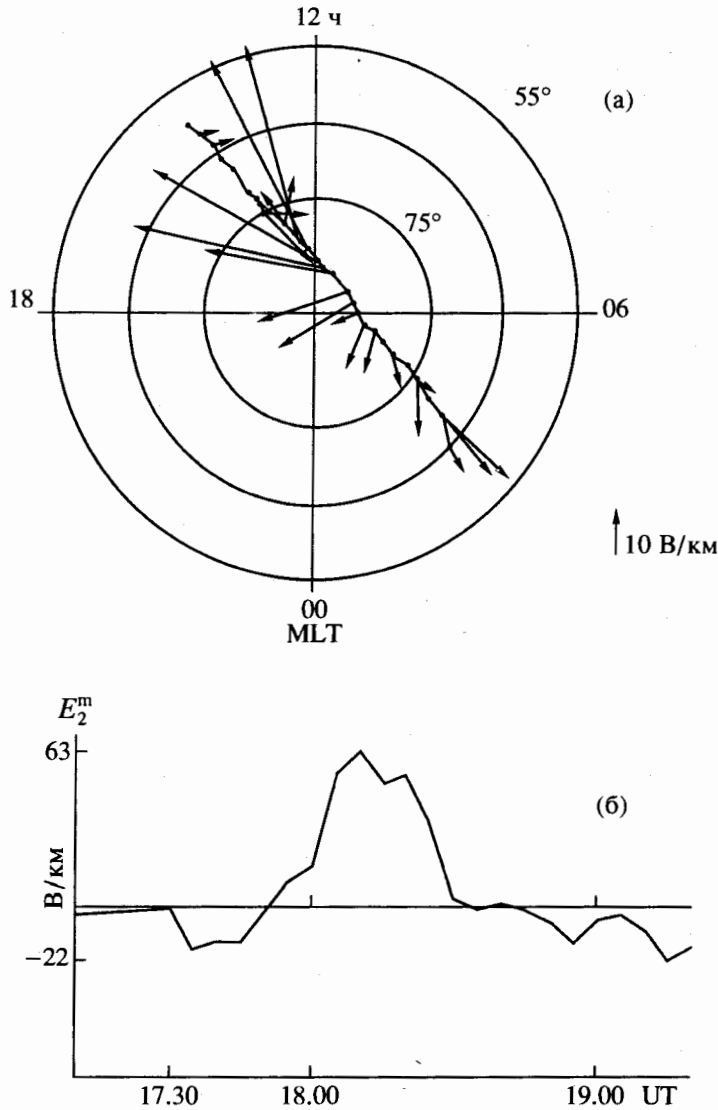


Рис. 5. Модельные значения электрического поля, вычисленные при учете временных вариаций  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП и при 10 мин временном сдвиге между условиями в солнечном ветре и их откликом в ионосфере:

а – векторы электрического поля вдоль траектории Викинга с интервалом в 5 мин; б – проекция этих векторов на направление движения спутника.

до ~19.05 UT и медленным уменьшением до отрицательных значений на широтах овала полярных сияний, начавшимся в 19.10 UT.

Значения  $E^m$ , приведенные на рис. 5, были получены при модельных вычислениях до того, как нам стали доступны измерения электрического поля на Викинге. Назовем их прогнозируемыми, так как их можно рассматривать как прогноз распределения электрического поля над ионосферой на основе данных о межпланетной среде. Сопоставление прогнозируемых значений  $E^m$  с измерениями на Викинге позволяет оценить достоверность модели, ее пригодность для описания временных изменений электромагнитной погоды в высокоширотной области. Векторы  $E^m$ , изобра-

женные на рис. 5а, были спроектированы на то же направление, что и измеренное на борту спутника электрическое поле. Полученные таким образом значения электрического поля, обозначаемые  $E_2^m$ , вычислялись для каждого 5 мин интервала. На рис. 6 сопоставлены  $E_2^m$  с измеренной компонентой электрического поля  $E_2$  вдоль траектории Викинга. Величины  $E_2$ , осредненные за время оборота спутника (20 с), были затем осреднены за интервал в 2 мин. При сопоставлении  $E_2^m$  и  $E_2$  необходимо учитывать изменение напряженности электрического поля с высотой,  $E_2^m$  соответствует высоте динамо-области ионосферы, где текут ионосферные токи. Поэтому значения

$E_2$  были спроектированы с высоты спутника (~8000 - 13000 км) на высоту 100 км в предположении отсутствия продольного падения потенциала между двумя высотами.

Расчеты  $E_2^m$  были проведены для различных величин временных сдвигов ММП,  $\Delta T$  менялось от 10 до 30 мин. На рис. 6а  $\Delta T = 10$  мин, а на рис. 6б  $\Delta T = 20$  мин. Из приведенных данных следует достаточно хорошее согласие модельных и измеренных вдоль траектории электрических полей. Даже резкое уменьшение  $E_2$  в 18.05 UT проявляется в модельных данных для  $\Delta T = 20$  мин (рис. 6б). Коэффициенты корреляции между кривыми  $r = 0.77 \pm 0.1$  и  $0.88 \pm 0.07$ , а среднеквадратичные отклонения  $\sigma = 15.6$  и  $15.5$  мВ/км соответственно для  $\Delta T = 10$  и  $20$  мин. Значения  $r$  уменьшаются, а  $\sigma$  увеличиваются при росте  $\Delta T$ . Для  $\Delta T = 30$  мин  $r = 0.44 \pm 0.16$ ,  $\sigma = 24.8$  мВ/км. Таким образом, модель достаточно хорошо описывает крупномасштабные вариации электрического поля вдоль траектории спутника.

Значение  $\Delta T = 20$  мин следует сопоставить со временем переноса ММП к магнитопаузе. Спутник ИМП-8, на котором измерялись компоненты ММП, располагался в точке с солнечно-эклиптическими координатами  $X = 32.4R$ ;  $Y = -16.8R$  (где  $R$  – радиус Земли). Между 17.00 и 18.00 UT скорость солнечного ветра составляла 475 км/с, а плотность  $22 \text{ см}^{-3}$ . Геоцентрическое расстояние подсолнечной точки магнитопаузы для таких параметров солнечного ветра составляет  $\sim 7.5R$ . Следовательно, спутник располагался на  $\sim 23R$  против течения от подсолнечной точки ударной волны. Движение солнечного ветра с вмороженным магнитным полем происходит вблизи Земли радиально, т.е. вдоль координаты  $X$ . С учетом ориентации и величины  $V_x$  и  $V_y$  компонент ММП возмущение сначала пересекает спутник, а затем через  $\sim 4$  мин ударную волну. Еще 4 мин необходимы для солнечного ветра, чтобы достичь магнитопаузы [14]. Таким образом, запаздывание между вариациями электрического поля на Викинге и модуляцией компонент ММП на магнитопаузе составляет  $\sim 12$  мин. Согласно [15] конвекция в ионосфере реагирует на вариации ММП на магнитопаузе с запаздыванием  $\sim 14$  мин, а в [16] это запаздывание составляет 5 - 9 мин. Таким образом, результаты настоящего исследования близки к оценкам запаздывания, полученным другими авторами.

При модельных вычислениях был использован шаг в 5 мин. Именно такой шаг обусловлен тем, что изменение положения спутника вдоль траектории за этот интервал примерно соответствует пространственному масштабу модели. Значения  $r$  и  $\sigma$ , приведенные выше, могут зависеть от используемого для расчетов временного шага. Определение правильных значений шага

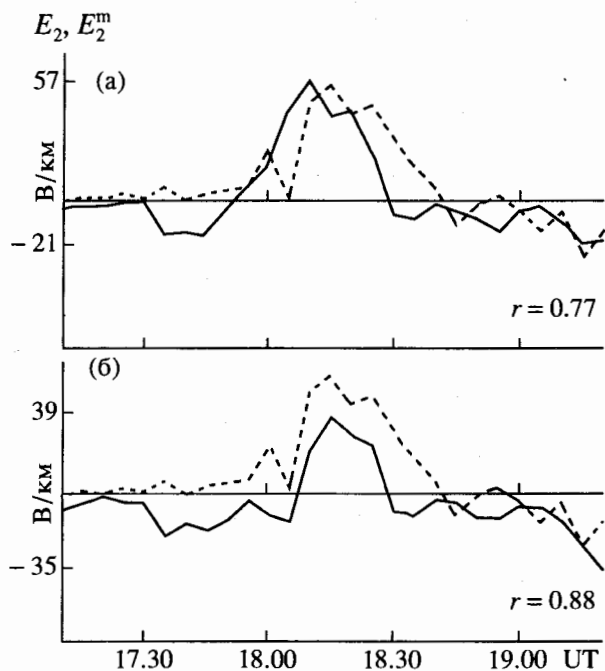


Рис. 6. Сопоставление предсказанных  $E_2^m$  (непрерывная линия) и наблюдаемых  $E_2$  (штриховая) величин компонент электрического поля вдоль траектории Викинга:

а – для 10 мин временного сдвига; б – для 20 мин временного сдвига.

позволяет оценить пространственный или временной масштабы вариаций электрического поля, которые значительно хуже описываются используемой моделью. Для такого исследования проведено дополнительное моделирование с временными шагами в 2, 4, 6, 8, 10 и 15 мин и временным сдвигом  $\Delta T = 20$  мин. Значения  $r$  увеличиваются от 0.69 до 0.88 при увеличении  $\Delta T$  от 2 до 5 мин и сохраняются на уровне 0.86 - 0.88 для  $\Delta T$  в 10 и 15 мин. Величина  $\sigma$  уменьшается от 21 до 15 нТ. Очевидно, что для изучаемого случая модельные вычисления, использующие шаг в 5 мин, достаточно хорошо описывают наблюдаемое распределение электрических полей и их вариации. Согласие между  $E_2$  и  $E_2^m$  означает, что модельные расчеты могут быть использованы для описания временных изменений электростатического потенциала (конвекции) и электрического поля во всей области высоких широт.

Мелкомасштабные вариации электрических полей, обусловленные дугами полярных сияний, находятся за пределами возможности модели. Это относится, в частности, к интервалу 18.37 - 19.06 UT, отмеченного крестиками на траектории спутника на рис. 2б. В этом интервале измерения авроральной плазмы на спутнике показали, что он пересекал силовые линии, проектирующиеся



на полярные дуги. Довольно значительные мелкомасштабные изменения электрического поля быстро меняли направление вектора электрического поля. При двухминутном осреднении эти вариации сглаживаются.

Следует отметить, что в данной работе впервые проведено непосредственное сопоставление модельных расчетов высокоширотных электрических полей (основанных на наземных вариациях геомагнитного поля) с изменениями на спутнике Викинг.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Электромагнитная погода в высокоширотной ионосфере, которая определяется состоянием межпланетной среды и магнитосферы, может быть описана с помощью моделей крупномасштабных электрических полей и токов [4, 12]. Эти модели, основанные на методе восстановления крупномасштабных токовых систем по наземным магнитным вариациям, способны описать пространственно-временное распределение электрического поля в области высоких широт (см. рис. 6). Для модельных расчетов полей и токов используются модели проводимости ионосферы, а также ряд предположений, которые не всегда точно воспроизводят условия, существующие в авроральной ионосфере. Наиболее заметное расхождение между модельными расчетами и экспериментальными данными существуют в периоды суббурь и бурь, когда локальные вариации ионосферной проводимости и токов не могут быть учтены моделью.

Хорошее согласие между наблюдаемыми и спрогнозированными значениями электрического поля над авроральной ионосферой при пролете Викинга 3.VIII. 1986 г. не означает, что моделирование будет успешным в применении к другим случаям. Дело в том, что данный пролет пришелся на интервал, когда электродинамика процессов в высоких широтах контролировалась непосредственно вариациями параметров солнечного ветра (прямое действие). Именно такое прямое действие было во время исследуемого события, ибо изменения в магнитосфере приходились на интервал до начала фазы развития магнитосферной суббури. Модель [4] основана на таких вариациях магнитных полей в высоких широтах, которые напрямую связаны с вариациями  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП.

Важным входным параметром при моделировании служит распределение ионосферной проводимости. Статистическая модель [6] для  $K_p < 3$  и  $K_p > 3$ , которая использовалась в модельных расчетах соответственно для интервалов с  $B_z > 0$  и  $B_z \leq 0$ , является только приближением для реальных условий, существовавших при пролете Ви-

кинга. В частности, модель не учитывает возрастания проводимости, связанного с существованием  $\Theta$ -сияния в полярной шапке [1]. Известно, что распределение электростатического потенциала и электрического поля критически зависит от ионосферной проводимости [17, 18]. Однако в летний сезон часть интегральной проводимости ионосферы, обусловленная волновым солнечным излучением, оказывает стабилизирующий эффект на распределение суммарной проводимости. Существование волновой части сглаживает иррегулярности проводимости, связанные с вторжением частиц. По-видимому, увеличение корпускулярной составляющей проводимости в полярной шапке в данном случае не влияет на крупномасштабные распределения электростатического потенциала и электрического поля. Увеличение проводимости в окрестности  $\Theta$ -сияния и соответствующие локальные изменения электрических полей отчетливо проявляются в измерениях электрического поля в этом районе вдоль траектории Викинга.

После поворота ММП к югу в  $\sim 18.00$  UT 3.VIII усиливаются вариации магнитного поля в авроральной зоне. По-видимому, такие вариации описываются токовой системой DP2 [19]. Запаздывание вариаций электрического поля относительно ММП на  $\sim 20$  мин представляет характерное время генерации трехмерной токовой системы, связывающей магнитосферу с ионосферой [20].

При моделировании электромагнитной погоды, связанном с пролетом Викинга, была продемонстрирована необходимость учета вариаций параметров межпланетной среды. За интервал около двух часов, необходимых для пересечения спутником высокоширотной области, произошли радикальные изменения в ориентации и интенсивности ММП. Моделирование всего пролета с использованием только одного характерного состояния магнитосферы, вряд ли реалистично.

Рассматриваемый пролет спутника приходится на интервал существования  $\Theta$ -сияния, когда экспериментальные данные о характере конвекции в полярной шапке весьма противоречивы: конвекция над трансполярной полосой свечения направлено к Солнцу [21 - 23] с обращением конвекции по обе стороны от полосы [21, 22] или с сохранением направления между полосой и овалом [23]; конвекция антисолнечная [24] или происходит как к Солнцу, так и от Солнца [25].

3.VIII. 1986 г. траектория Викинга пересекала полосу аврорального свечения в 18.37 - 19.06 UT (см. рис. 2). Эта часть траектории располагается непосредственно в районе фокуса утреннего вихря конвекции. К полюсу от фокуса конвекция антисолнечная, к экватору - в направлении на Солнце, т.е. электрическое поле меняет направление в окрестности фокуса вихря. Это означает,

что конвекция происходит примерно вдоль полосы свечения, а сама полоса располагается вдоль границы областей с различным направлением конвекции. От полосы свечения в полярной шапке и до широт овала полярных сияний в утреннем секторе конвекция всюду направлена к Солнцу, что согласуется с результатами [23].

Для интерпретации крупномасштабной конвекции в период  $\Theta$ -сияний в [26] предложена модель пересоединения северного ММП с магнитными силовыми линиями магнитосферы. Предполагалось, что интенсивность компонент вектора ММП, характеризующих временной интервал с существованием  $\Theta$ -сияний, может быть получена как среднее значение поля за относительно продолжительный интервал времени.

Использование такой методики для события 3.VIII. 1986 г. в интервале 1 ч до начала - момент конца наблюдения аврорального свечения (17.00 - 19.26 UT) дало среднее значение  $B_z = 6.6$  нТ. Все другие случаи, рассмотренные в [26], аналогично характеризовались северным ММП. Отсюда следовало заключение, что события с  $\Theta$ -сиянием сопровождаются исключительно конвекцией в направлении к Солнцу в центральной части полярной шапки. Однако случай 3.VIII. 1986 г. не укладывается в такую схему. Выше показано, что за время существования  $\Theta$ -сияния происходят коренные изменения в характере крупномасштабной конвекции. В частности, когда  $B_z$  компонент ММП поворачивается к югу, конвекция через полярную шапку становится антисолнечной. Поэтому, хотя полярные сияния в полярной шапке чаще существуют при конвекции к Солнцу через центральную часть полярной шапки, они могут появляться также и при антисолнечной конвекции. Этот факт следует иметь в виду при разработке моделей полярных дуг. Кроме того, при модельных расчетах необходимо учитывать возможные изменения компонент ММП.

Событие, аналогичное рассмотренному выше, когда в начале пролета Викинга  $B_z > 0$ , а затем ММП повернулось к югу, произошло 25.IX. 1986 г. Электродинамика магнитосферы для этого события на основе распределения аврорального свечения и крупномасштабных продольных токов, характерных для интервала  $B_z > 0$ , проанализирована в [27].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 93-05-8722-94-05-16273а, Международного научного фонда по проекту М6Р000 и Шведского национального космического агентства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Craven J.D., Murphree J.S., Frank L.A., Cogger L.L. Simultaneous Optical Observations of Transpolar Arcs in the Two Polar Caps with DE-1 and Viking // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 2297.
2. Erlandson R.E., Sibeck D.G., Lopez R.E. et al. Observations of Solar Wind Pressure Initiated Fast Mode Waves at Geostationary Orbit and in the Polar Cap // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1991. V. 53. P. 231.
3. Feldstein Y.I., Vorobjev V.G., Leontyev S.V. et al. Auroras in the Polar Cap // *IRF Scientific Report* 209. 1992. P. 123 - 140.
4. Левитин А.Е., Фельдштейн Я.И., Афонина Р.Г. et al. Модель крупномасштабного электрического поля и токов в высокоширотной ионосфере. Ч. 1 - 6. М.: Гидрометеоздат, 1984.
5. Levitin A.E., Afonina R.G., Belov B.A., Feldstein Y.I. Geomagnetic Variation and Field-Aligned Currents at Northern High-Latitudes and their Relations to Solar Wind Parameters // *Phil. Trans. R. Soc.* 1982. V. A304. P. 253.
6. Wallis D.D. and Budzinski E.E. Empirical Models of Height Integrated Conductivities // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 125.
7. Burch J.L., Reiff P.H., Menietti J.D. et al. IMF  $B_y$ -Dependent Plasma Flow and Birkeland Currents in the Dayside Magnetosphere. 1: Dynamics Explorer Observations // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 1577.
8. Reiff P.H., Burch J.L. IMF  $B_y$ -Dependent Plasma Flow and Birkeland Currents in the Dayside Magnetosphere. 2: A Global Model for Northward and Southward IMF // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 1595.
9. Block L.P., Falthammar C.-G., Lindqvist P.-A. et al. Measurement of Quasistatic and Low Frequency Electric Fields on the Viking Satellite // *Royal Inst. of Technology Rep., TRITA-EPP-87-02.* Stockholm, 1987.
10. Фельдштейн Я.И., Сумарук П.В., Шевнина Н.Ф. Определение азимутальной компоненты межпланетного магнитного поля по наземным наблюдениям // *Доклады АН СССР.* 1975. Т. 222. С. 833 - 836.
11. Feldstein Y.I., Levitin A.E., Faermark D.S. et al. Electric Field and Potential Patterns in the High-Latitude Ionosphere for Different Situations in Interplanetary Space // *Planet. Space Sci.* 1984. V. 32. P. 907.
12. Friis-Christensen E., Kamide Y., Richmond A.D., and Matsushita S. Interplanetary magnetic field control of high-latitude electric field and currents determined from Greenland magnetometer data // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 1325.
13. Lindqvist P.-A., Marklund G.T. A Statistical Study of High-Latitude Electric Fields Measured on the Viking Satellite // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 5867.
14. Spreiter J.R., Stahara S.S. A New Predictive Model for Determining Solar Wind - Terrestrial Planet Interaction // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 6769 - 6777.
15. Clauer C.R., Banks P.M. Relationship of the Interplanetary Electric Field to the High-Latitude Ionospheric Electric Fields and Currents: Observations and Model Simulation // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 6959 - 6971.

16. *Greenwald R.A., Baker K.B., Ruohoniemi J.M. et al.* Simultaneous Conjugate Observations of Dynamic Variations in High-Latitude Dayside Convection due to Changes on IMF  $B_y$  // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 8057 - 8072.
17. *Blomberg L.G., Marklund G.T.* The Influence of Conductivities Consistent with Field-Aligned Currents on High-Latitude Convection Patterns // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 14493.
18. *Ahn B.-H, Kamide Y., Akasofu S.I. et al.* Ionospheric Conductivity Dependence of the Cross Polar Cap Potential Difference and Global Joule Heating Rate // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1989. V. 51. P. 841 - 859.
19. *Nishida A.* Coherence of Geomagnetic DP 2 Fluctuations with Interplanetary Magnetic Variation // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5549.
20. *Ляцкий В.Б.* Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. Л.: Наука, 1978. С. 196.
21. *Frank L.A., Craven J.D., Gurnett D.A. et al.* The Theta Aurora // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 3177.
22. *Gusev M.G., Troshichev O.A.* Relation of Sun-Aligned Arcs to Polar Cap Convection and Magnetic Disturbances // *Planet. Space Sci.* 1990. V. 38. P. 1 - 11.
23. *Murphree J.S., Austin J.B., Hearn D.J. et al.* Satellite Observations of Polar Arc // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1994. V. 56. P. 256 - 284.
24. *Robinson R.M., Vondrak R.R., Friis-Christensen E.* Ionospheric Currents Associated with a Sun-Aligned Arc Connected to the Auroral Oval // *Geophys. Res. Lett.* 1987. V. 14. P. 656 - 659.
25. *Mende S.B., Doolittle J.H., Robinson R.M. et al.* Plasma Drifts Associated with a System of Sun-Aligned Arcs in the Polar Cap // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 94. P. 256.
26. *Burch J.L., Saflekos N.A., Garnett D.A. et al.* The Quiet Time Polar Cap: DE-1 Observations and Conceptual Model // *J. Geophys. Res.* 1992. P. 19403 - 19412.
27. *Marklund G.T., Blomberg L.G., Murphree J.S. et al.* On the Electrodynamical State of the Auroral Ionosphere during Northward Interplanetary Magnetic Field: A Transpolar Arc Case Study // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 9567.

## Electromagnetic Weather Above the High-Latitude Ionosphere during the Aurora in the Polar Cap

Y. I. Feldstein, A. E. Levitin, L. I. Gromova, G. T. Marklund,  
L. G. Blomberg, and P.-A. Lindqvist

Model simulations of the electromagnetic weather (spatial-temporal distributions of the electrostatic potential and the electric field) above the high-latitude ionosphere are correlated with electric field measurements by the *Viking* satellite on August 3, 1986, when a wide band of the bright aurora ( $\theta$ -aurora) existed in the polar cap. The simulations use a variable time shift from 10 to 30 min between measurements of interplanetary magnetic field components by the *IMP-8* satellite in the solar wind and the electric field by *Viking*. The best agreement between observed and calculated values of the field is obtained with a time shift of approximately 20 min (correlation coefficient  $r = 0.88 \pm 0.07$ ). A good agreement between calculated and observed values of the field along the *Viking* trajectory suggests that this model can be used to describe time variations in plasma convection and the electric field in the whole high-latitude region. It is shown that the nature of large-scale convection changes significantly during the lifetime of the  $\theta$ -aurora.