

УДК 523.9 : 520.876

© 1996 г. А.В. Кустов, Г.Дж. Софко, Я.И. Фельдштейн, Л.И. Громова,  
А.Е. Левитин, Р.А. Гринвальд, Дж.М. Руохониеми

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ ДНЕВНОЙ КОНВЕКЦИИ ПО ДАННЫМ РАДАРОВ СуперДАРН И МОДЕЛЬЮ ИЗМЭМ

Данные о структуре ионосферной конвекции в околополюденной области, полученные с помощью канадо-американской пары радаров СуперДАРН, сравнены с результатами расчетов по модели ИЗМЭМ (Институт земного магнетизма электродинамическая модель), входными параметрами которой являются компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и данные о плазме солнечного ветра. Рассмотрена ситуация в межпланетном пространстве при стабильных отрицательных значениях  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП. Получено достаточно хорошее соответствие модельных расчетов и эксперимента. Обсуждаются задачи последующих этапов исследования и возможные приложения полученных результатов.

### Введение

Структура конвекции ионосферной плазмы в высоких широтах является ключевой при интерпретации магнитосферно-ионосферного взаимодействия [1–3]. Многочисленные измерения на космических аппаратах, аэростатах и ракетах позволили выявить основные закономерности поведения конвекции в зависимости от условий в межпланетной среде и состояния магнитосферы, в первую очередь от ориентации вектора межпланетного магнитного поля (ММП). Результатом обобщения отдельных измерений явились глобальные пространственно-временные распределения конвекции в полярной ионосфере для различных сочетаний компонент вектора ММП [3–6].

Усредненная картина ионосферной конвекции интенсивно исследуется в последние два десятилетия методом численного моделирования [3, 6–9]. Такой подход позволяет получить распределение конвекции в высоких широтах в целом, "сглаживая" детали пространственно-временного распределения в каждой конкретной области высокоширотной ионосферы. Достоинством этого метода является возможность относительно быстро оценить глобальную структуру конвекции в конкретный момент, включая и такие интервалы, когда непосредственные измерения по каким-либо причинам затруднены. Принципиальным вопросом для такого рода оценок является точность численных моделей.

Существует несколько подходов к численному моделированию в зависимости от выбора входных данных, необходимых для расчета [6, 7, 9]. Один из них, развиваемый в ИЗМИРАН (модель ИЗМЭМ), использует факт наличия корреляционной связи между компонентами вектора ММП и вариациями геомагнитного поля на поверхности Земли [6, 8]. Входными параметрами для ИЗМЭМ является плотность и скорость плазмы солнечного ветра, ориентация и напряженность ММП. В рамках модели рассчитываются глобальные распределения электростатического потенциала (конвекции плазмы), вектора электрического поля, ионосферного и продольного тока, джоулевой диссипации в ионосфере.

Успех практического применения указанной модели в значительной степени зависит от соответствия результатов моделирования экспериментальным данным. В [6, 10] показано, что расхождения модельных оценок и спутниковых измерений невелики. Однако, такое сопоставление расчетов и практически "моментального" снимка кон-

векции вдоль траектории низколетящего спутника (разреза) по существу является одномерным. В недавней работе [11] проведено сопоставление двухмерной картины структуры конвекции согласно модели ИЗМЭМ с измерениями станции некогерентного рассеяния. Для уточнения параметров модели [6] необходима дальнейшая ее калибровка по независимым экспериментальным данным, относящимся к различным ситуациям в межпланетной среде.

В последние годы, с введением в строй системы радаров СуперДАРН (супер сеть двойных авроральных радаров) [12], появились новые возможности как в непосредственном исследовании структуры конвекции ионосферной плазмы и ее изменений во времени с большой дискретностью, так и в тестировании и калибровке различных численных моделей. Радары СуперДАРН позволяют вести систематическое наблюдение конвекции ионосферной плазмы в значительных по размерам областях высокоширотной ионосферы с пространственным разрешением 50–100 км и временным разрешением ~1 минуты.

Целью настоящей работы является сопоставление результатов численного моделирования конвекции плазмы по модели ИЗМЭМ и измерений радаров СуперДАРН для определения точности модельных расчетов в условиях отрицательных значений  $V_z$  и  $V_y$  компонент ММП.

### Проект СуперДАРН

Проект СуперДАРН включает несколько пар импульсных КВ радаров (частоты зондирования 10–20 МГц), расположенных в южном и северном полушариях [12]. Каждый из радаров имеет антенну со сканированием радиолуча по азимуту (ширина радиолуча на типичных частотах 12–14 МГц ~4°). 16 возможных позиций радиолуча, разнесенных по азимуту на 3,25°, проходятся примерно за 96 секунд, так что в каждой позиции сигналы принимаются и накапливаются в течении 5 с. Для каждого положения радиолуча измеряется амплитуда и доплеровская скорость сигналов на дальностях 300–3000 км с усреднением по дальности в 45 км. Сканирование радиолучей в отдельной выбранной паре радаров синхронизовано таким образом, что очередной скан начинается (кончается) на каждом из радаров одновременно. В результате, за один полный скан по азимуту, при наличии эхо, возможно получение информации из 256 ионосферных областей, причем в каждой области из двух различных направлений.

Методика радарного метода определения вектора конвекции плазмы из доплеровских изменений радиоэхо описана в [12, 13]. Вкратце она сводится к следующему. Прежде всего, из принятых сигналов выделяются авроральные эхо, возникающие из-за рассеяния на ионосферных неоднородностях  $F$ -слоя. Рассеяния из  $E$ -слоя обычно несут существенны. Например, для пары радаров Саскатун-Капускесинг наклонные дальности в зоне пересечения лучей более 1200 км, т.е. превышают радио горизонт для наблюдения неоднородностей в  $E$ -слое. В стандартной методике высота рассеяния принимается в 300 км. Предполагается, что доплеровская скорость сигналов рассеяния на неоднородностях  $F$ -слоя является косинус компонентой полного вектора конвекции плазмы ( $E \times B$  дрейфа). Подобное предположение базируется на факте малости отличия фазовой скорости ионосферных неоднородностей  $F$ -слоя от средней скорости  $E \times B$  дрейфа плазмы как целого. При наличии скорости конвекции плазмы в двух различных направлениях полный вектор скорости находится процедурой геометрического сложения отдельных косинус-компонент [13]. Точность такого радарного метода измерения скорости конвекции, согласно неоднократным проверкам [12], достаточно высока.

### Событие 6 марта 1994 г.

В данной работе рассматривается событие 6 марта 1994 г., для которого были получены данные в значительной части зоны измерений канадо-американской пары радаров СуперДАРН. На рис. 1 на карте канадского сектора Арктики указано место-

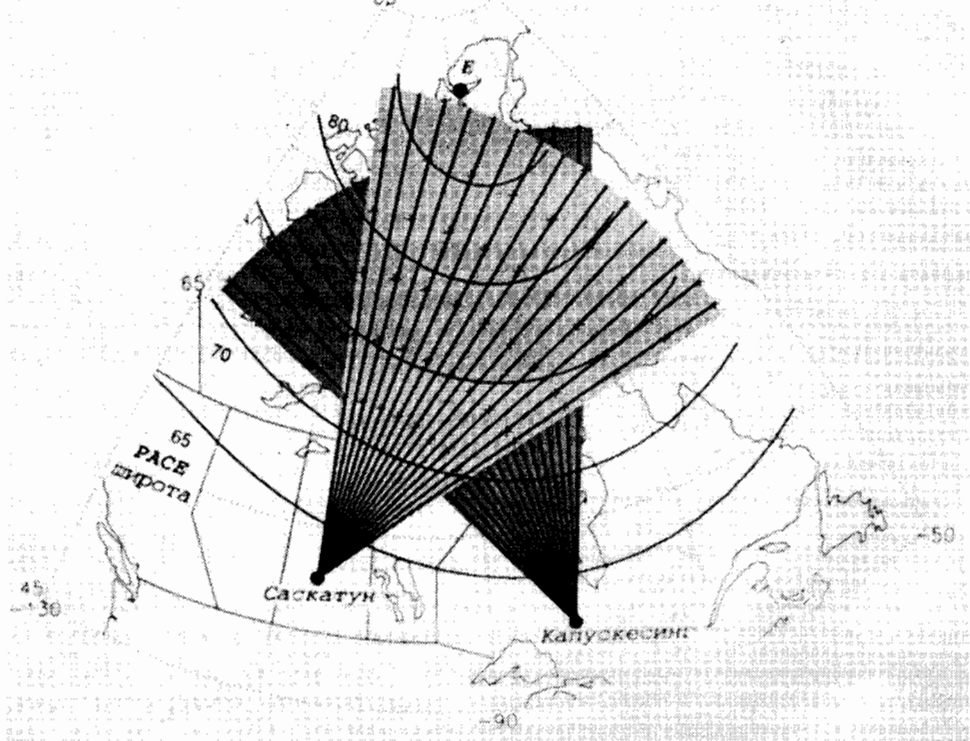


Рис. 1. Схема расположения и зона обзора канадо-американской пары радаров СуперДАРН с приемно-передающим оборудованием вблизи пунктов Саскатун и Капускесинг

положение радаров в Саскатуне и Капускесинг, а также изображены возможные позиции их радиолучей с 400 км метками дальности (1200–3000 км). Сектор наблюдений радара в Саскатуне простирается вплоть до зенита высокоширотной обсерватории Эврика, расположенной вблизи исправленного геомагнитного полюса. На рис. 1 толстыми линиями изображены геомагнитные параллели согласно модели RACE [14]. Эта модель геомагнитного поля принята для представления и сопоставления данных, полученных в эксперименте СуперДАРН на различных парах радаров (включая южное полушарие), в связи с чем она использована и в настоящей работе. Геомагнитная широта модели RACE совпадает с исправленной геомагнитной широтой, а местное геомагнитное время вычисляется с учетом сезонных вариаций (уравнение времени).

Событие 6 марта 1994 г. в 19–21 UT было выбрано по нескольким соображениям. Во-первых, достаточно интенсивное  $F$ -рассеяние наблюдалось в значительной области широт и долгот, так что СуперДАРН карты конвекции охватывали значительную область высокоширотной ионосферы. Во-вторых, индивидуальные карты конвекции (за 96 с. интервалы измерений) были достаточно похожими, так что было правомерным усреднение данных по нескольким сканам для получения сглаженной картины ионосферных дрейфов. В-третьих, в течение рассматриваемого промежутка, согласно измерениям на спутнике ИМП8, плотность и скорость частиц плазмы солнечного ветра изменялись незначительно и плавно, а компоненты ММП были достаточно стабильными со средними значениями  $B_z$  около  $-5$  нТл и  $B_y$  около  $-5$  нТл. Планетарная магнитная возмущенность за рассматриваемый период была умеренной,  $K_p = 3$ ,  $Dst = -16$  нТл, после чего  $Dst$ -индекс начал увеличиваться.

Для непосредственного сопоставления результатов измерений и моделирования был выбран промежуток 19 : 49–20 : 00 UT. На рис. 2 представлено по измерениям пары

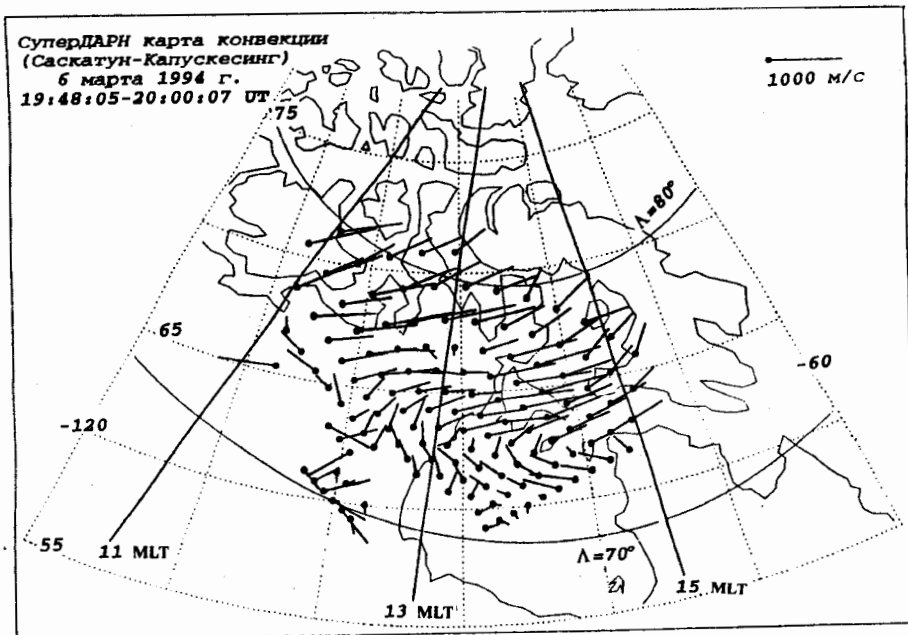


Рис. 2. Пространственно-временное распределение конвекции, наблюдавшейся радаром СуперДАРН 6 марта 1994 г., 19:48:05–20:00:07 UT, положенная на очертание береговой линии в канадском секторе Арктики. Стрелками в масштабе указаны направления и величины скорости дрейфа неоднородностей на высотах слоя  $F$  ионосферы. Параллели  $70^\circ$  и  $80^\circ$  в координатной системе PACE

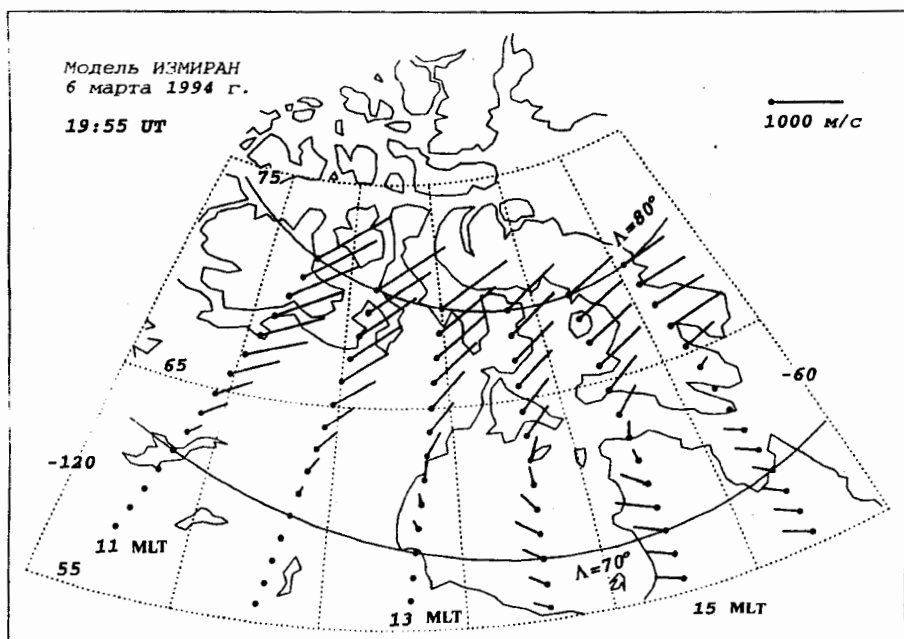


Рис. 3. Пространственно-временное распределение конвекции, по модели ИЗМИРАН [6, 11] для момента 19.55 UT, в формате, идентичном формату данных СуперДАРН.  $B_z = -3,5$  нТл;  $B_y = -7,2$  нТл

радаров Саскатун-Капускесинг распределение векторов скорости конвекции, осредненных в этом интервале. Там же нанесены РАСЕ долготы, соответствующие 11, 13 и 15 часам местного геомагнитного времени (MLT). Как следует из рис. 2 район измерений охватывал полуденный и послеполуденный сектор высокоширотной ионосферы. Очевидно, измерениями захватывалась область поворота конвекции с направленного на запад течения на южной границе района измерений на направленное на восток на северной кромке. Характерно, что на одинаковых широтах, но в различных временных секторах, конвекция плазмы была похожей по величине и направлению. Исключение составляет лишь экваториальная кромка зоны наблюдений, где течение было заметно неоднородным.

### Моделирование

Пространственно-временное распределение конвекции плазмы, соответствующее моменту 19.55 UT (примерно середина рассматриваемого промежутка) была рассчитана по методике [6, 8]. При расчетах использовалась 8-мин. задержка между измерениями параметров солнечного ветра на спутнике ИМП8 и моментом расчета, что представляется разумным при учете положения спутника (примерно  $15 R_E$  от земной поверхности). Компоненты ММП принимались согласно наблюдениям равными:  $V_y = -7,2$  нТл,  $V_z = -3,5$  нТл. На рис. 3 представлены результаты расчета в формате, аналогичном формату радарных данных, так что грубое сопоставление может быть произведено визуально. Согласно расчетам, в секторе наблюдений имело место течение плазмы на запад на низких широтах и на восток на более высоких широтах. Восточно-западный градиент изменения величины и направления векторов незначителен. Таким образом, пространственно-временное распределение модельной конвекции идентично наблюдавшейся радарам.

### Количественное сопоставление результатов измерений и расчетов

Для количественного сопоставления результатов измерений и моделирования было проведено усреднение величины и направления векторов дрейфа вдоль линий равных геомагнитных широт с шагом по широте в  $1^\circ$ , что позволило получить 10 различных средних значений скоростей конвекции согласно измерениям ( $V_{cd}$ ) и модельным расчетам ( $V_{mod}$ ). Как и ожидалось, для широты  $71^\circ$  имели место значительные расхождения в предсказаниях и модели (различия в азимуте около  $140^\circ$ ). Эти данные ниже не рассматриваются, а возможная причина расхождений обсуждается в дискуссии. На рис. 4а, б сравниваются результаты расчета и измерений отдельно по величине среднего дрейфа неоднородностей в ионосфере и его направлению. Азимут векторов конвекции отсчитывался от направления на восток против часовой стрелки. Как следует из приведенных на рис. 4 данных величина дрейфа по расчетам слегка завышена в большинстве точек и заметно превышает наблюдавшуюся лишь при больших значениях скорости конвекции (северная кромка зоны наблюдений). Направления конвекции различаются несущественно (не более  $30^\circ$ ). В целом, в пределах точности измерений, имеет место соответствие измеренных и модельных величин скорости и направления дрейфа. Коэффициенты корреляции между измеренными и рассчитанными по модели значениями, по величине скорости 0,89, по направлению конвекции 0,98.

Оценка соответствия модельных и экспериментальных данных была произведена также путем их сопоставления в конкретных точках. Поскольку координаты точек, в которых производилось моделирование (каждый градус геомагнитной широты) в большинстве случаев не совпадали с центрами рассеивающих объемов СуперДАРН, вектор скорости конвекции в выбранной точке моделирования сопоставлялся с усредненным вектором СуперДАРН по нескольким точкам (от 1 до 6), расположенным на удалении от точки моделирования не более чем  $1,5^\circ$  по широте или долготе. Удаление

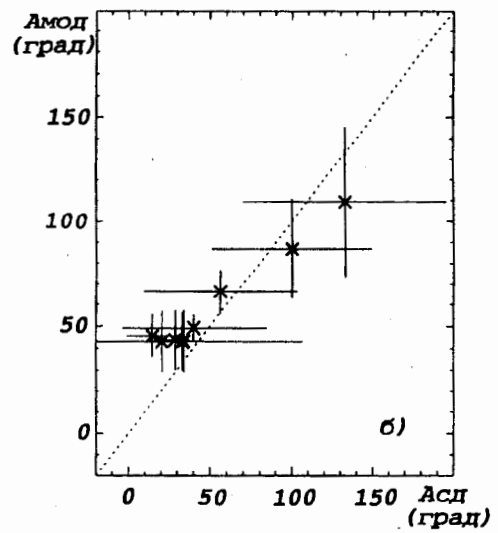
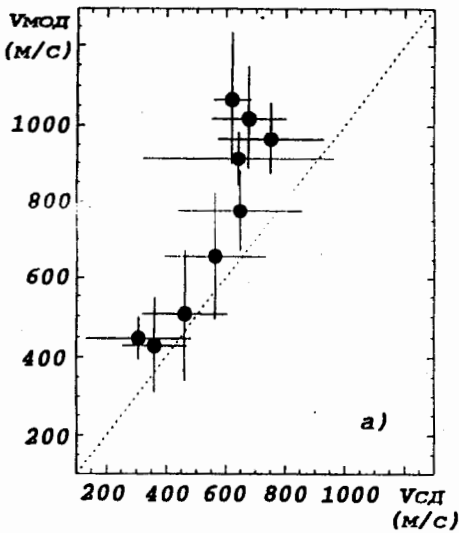


Рис. 4. Сопоставление средних значений величины и направления скорости конвекции плазмы, осредненных вдоль геомагнитных параллелей

на  $1,5^\circ$  сопоставимо с размером практического объема усреднения данных Супер ДАРН, поскольку один вектор скорости СуперДАРН по-существу получается по данным, полученным в двух – трех стандартных импульсных объемах вдоль каждого радиолуча (импульсная длина 45 км). Оказалось, что такой критерий отбора позволяет провести сопоставление в 41 "общей" точке. При сопоставлении в рассмотрение были включены точки, расположенные на экваториальной границе зоны наблюдений радиоэхо, где, как отмечалось выше, степень соответствия результатов моделирования и эксперимента была явно хуже, чем в среднем. Тем не менее, коэффициент корреляции по 41 точке оказался равным 0,62 по величине скорости и 0,74 по азимуту. Полученные величины также свидетельствуют об удовлетворительном соответствии результатов моделирования и измерений.

Модели типа ИЗМЭМ были созданы на основе количественных расчетов, опирающихся на конкретную модель проводимости ионосферы, и ряд физических постулатов, таких как проводимость Земли (учет вклада поля индукции), эквипотенциальность силовых линий геомагнитного поля, их вертикальность относительно ионосферы и т.п. [6]. Естественно, что для практического применения такие модели должны быть отнормированы на данных реальных измерений полей и токов с помощью спутников и радарных установок. Результаты такой калибровки [15, 8] позволили использовать модель ИЗМЭМ для определения пространственного распределения электрического поля в высокоширотной ионосфере и его изменения в периоды возмущений. Показано, что модель ИЗМЭМ описывает основные структурные особенности конвекции в зависимости от ситуации в ММП ( $B_y \geq 0$  нТл;  $B_z \geq 0$  нТл) и сезонов года. К ним относятся: общая структура конвекции (число вихрей и их расположение, области сложной конфигурации изолиний потенциала электрического поля); положение фокусов вихрей конвекции; районы смены направления конвекции. Соответственно амплитудное совпадение и совпадение направлений векторов скорости конвекции для модельных расчетов и эксперимента в различных областях будет неодинакова. Тем более, что модель создана на основе статистического усреднения среднечасовых значений поля, а экспериментальные данные являются более или менее "мгновенным снимком". Поэтому при интерпретации результатов отдельных спутниковых пролетов или ограниченных по пространству радарных наблюдений модель ИЗМЭМ позволяет дополнить результаты наблюдений путем:

- экстраполяции данных эксперимента за пределы области локальных наблюдений;
- разделения временных и пространственных вариаций векторов электрического поля при измерениях вдоль траектории спутника;
- оценки положения фокусов конвекционных вихрей и, соответственно, разности потенциалов через полярную шапку при пролетах спутника, траектории которых не пересекают фокусов вихрей конвекции;
- заключения на основе экспериментальных данных о структуре конвекции в высоких широтах (2, 3 или 4 вихря конвекции) соответствия наблюдений различным моделям конвекции, описываемых в литературе.

В результате достаточно широкомасштабного сопоставления расчетов по модели ИЗМЭМ с другими моделями и с данными наблюдений, может быть уточнена калибровка модели. В этом случае ее станет возможным использовать для количественной сверки разнородных наблюдений электродинамических параметров ионосферы, проведенных в различное время и в разных пунктах. Т.е. модельные расчеты станут пробным инструментом наподобие переносных магнитных приборов, применяемых для сверки магнитных стандартов на постоянно-действующих магнитных обсерваториях.

### Обсуждение

Рассмотренное в настоящей работе распределение конвекции является весьма типичным для условий  $B_z < 0$ ,  $B_y < 0$  в ММП. Такая ситуация достаточно подробно описана в модели Хеппнера и Мэйнарда ([4], рис. 2 их работы). При  $B_z < 0$  и  $B_y < 0$ , обычно имеет место двухвихревая структура конвекции с направлением течения плазмы от Солнца в околуполусной области. Граница раздела вихрей в дневном секторе обычно приходится на 10–12 MLT в зависимости от геомагнитной широты.

Радарные наблюдения относятся к небольшой части околуполуденного сектора на геомагнитных широтах 72–80°. По-существу, наблюдения охватывали околуполуденную часть вечернего вихря. Согласно рис. 2, в этом вихре поворот направления конвекции с западного (на утро, малые широты) на восточный (на вечер, большие широты) происходил на широте 72° примерно в 12 MLT, на широте 75° заметно раньше, в ~11 MLT, и вероятно еще раньше на широте 80°, что идеально соответствует эмпирической модели Хеппнера и Мейнарда [4]. Характерным для наблюдений и для этой модели представляется заметное увеличение скорости конвекции на больших широтах.

Проведенное сопоставление двумерных карт ионосферной конвекции, полученных путем численного моделирования, и непосредственно наблюдавшихся радаром СуперДАРН показало достаточно хорошее соответствие модельных расчетов и эксперимента, что говорит о надежности подхода [6, 11] для изучения усредненной, сглаженной картины электродинамических процессов в высокоширотной ионосфере в условиях отрицательных значений  $B_z$  компоненты ММП.

Отмеченные выше расхождения результатов расчетов и наблюдений по всей видимости связаны с несколькими причинами. Один из недостатков подхода [6, 11] заключается в использовании усредненной модели проводимости ионосферы. Это особенно существенно для полуночного сектора высокоширотной ионосферы, где из-за неоднородностей в проводимости, создаваемых авроральными вторжениями, точность модельных расчетов может быть понижена.

Выше отмечалось, что на широте ~71° имели место значительные расхождения по направлению конвекции. Согласно наблюдениям, на этих широтах конвекция плазмы была заметно неоднородной. Разумеется модель ИЗМЭМ, основанная на статистических соотношениях между параметрами солнечного ветра и электрическими полями (магнитными возмущениями), не в состоянии предсказать мелкомасштабные вариации конвекции. Эти несоответствия измерений и расчета в направлении дрейфа на широтах ~71° наглядно демонстрирует ограниченность модельного описания [6, 11] тонкой структуры в распределении электромагнитных параметров ионосферы.

Проведенный анализ показал, что для более детального сопоставления и, соответственно, более надежных выводов даже для условий  $Bz < 0$  необходимо располагать измерениями в более широком интервале широт и долгот. Введение в строй новых пар сети радаров СуперДАРН, осуществленное летом 1995 г., позволяет приступить к анализу соответствующих данных.

Опыт работы с данными СуперДАРН показал, что получение информации о конвекции плазмы зачастую затруднено из-за присутствия сильного отраженного сигнала от земной поверхности, когда КВ радиоволны после отражения от ионосферы распространяются к земной поверхности, отражаются от нее и возвращаются обратно посредством второго (на обратном пути) отражения от ионосферы [16]. Такие сигналы могут занимать значительную часть зоны обзора. Наличие модели, откалиброванной даже по небольшому району высокоширотной ионосферы, позволяет вести моделирование и оценку электромагнитной обстановки в других областях высоких широт, недоступных для непосредственных измерений.

Представляется целесообразным исследовать интервалы с ориентированной на север компонентой  $Bz$  ( $Bz > 0$ ) ММП, когда мнения о крупномасштабной структуре ионосферной конвекции значительно расходятся. На основе радиолокационных наблюдений необходимо выяснить, является ли структура конвекции при  $Bz > 0$  модификацией двухвихревой системы или существует 3 и более вихрей. Первая попытка [17] показала, что радарные данные весьма полезны в разрешении этой проблемы. Однако достаточно очевидно, что во многих случаях радиоэхо присутствуют только в ограниченных районах, что затрудняет получение надежных выводов.

В данной работе сделан лишь первый шаг в сопоставлении модельных расчетов и радарных наблюдений. В настоящее время ведется анализ более сложных ситуаций со стабильной положительной компонентой ММП, а также рассматриваются переходные процессы при вариациях  $Bz$  и  $B_y$  компонент ММП.

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке университета Саскатчеван со стороны Канадского Космического Агентства и ИЗМИРАН со стороны Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант 96-05-66279 и Международного Научного Фонда, грант М6Р300. Канадо-американская пара радаров СуперДАРН финансируется Национальным Научно-Инженерным Советом Канады и Агентством НАСА (США). Авторы благодарны доктору Р. Леппингу (Центр НАСА) за предоставленную возможность воспользоваться данными IMP8 по параметрам солнечного ветра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акасофу С.-И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика, М.: МИР. 1972. Ч. 2. 512 с.
2. *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Полярные магнитные возмущения. Л.: ЛГУ. 1975. 219 с.
3. *Kamide Y., Baumjohann W.* Magnetosphere-ionosphere coupling. New York: Springer-Verlag. 1993. 175 p.
4. *Heppner J.P., Maynard N.C.* Empirical high-latitude electric field models // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. N5. P. 4467.
5. *Heelis R.A.* The effects of interplanetary magnetic field orientation on dayside high-latitude convection // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 87. N5. P. 2873.
6. *Feldstein Y.I., Levitin A.E.* Solar wind control of electric fields and currents // *J. Geoelectr.* 1986. V. 38. N11. P. 1143.
7. *Richmond A.O.* Assimilative mapping of ionospheric electrodynamics // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12. P. 59-65.
8. *Papitashvili V.O., Belov B.A., Faermark D.S.* Electric potential patterns in the northern and southern polar regions parameterized by the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. N7. P. 13251.
9. *Marklund G.T., Blomberg L.G., Murphree J.S. et al.* On the electrodynamical state of the auroral ionosphere during northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 9567-9578.
10. *Feldstein Y.I., Levitin A.E., Faermark D.S. et al.* Electric fields and potential patterns in the highlatitude ionosphere for different situations in interplanetary space // *Planet. Space Sci.* 1984. V. 32. N7. P. 907.
11. *Papitashvili V.O., Clauer C.R., Levitin A.E., Belov B.A.* Relationship between the observed and modeled modulation of the dayside ionospheric convection by the IMF  $B_y$  component // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. N5. P. 7715.



12. *Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R. et al.* DARN/SuperDarn: A global view of the dynamics of high-latitude convection // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. N2. P. 761.
13. *Успенский М.В., Старков Г.В.* Полярные сияния и рассеяние радиоволн. Л.: Наука. 1987. 239 с.
14. *Baker K., Wing S.* A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 22. N7. P. 9139.
15. *Белов Б.А., Гальперин Ю.И., Зинин Л.В. и др.* Конвекция плазмы в полярной ионосфере: сравнение изменений со спутника Космос-184 с моделью, зависящей от вектора ММП // *Космич. исслед.* 1984. Т. 22. N2. С. 201.
16. *Bristow W.A., Greenwald R.A., Samson J.C.* Identification of high-latitude acoustic gravity wave sources using the Goose Bay HF radar // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. N1. P. 319.
17. *Greenwald R.A., Bristow W.A., Sofko G.J. et al.* SuperDARN radar imaging of dayside high-latitude convection under northward IMF: Towards resolving the distorted two-cell versus multi-cell controversy // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. N10. P. 19661.

Университет Саскачеван, Канада  
ИЗМИРАН, Россия

Лаборатория Прикладной Физики, США

Поступила в редакцию  
27.12.95

После доработки  
14.03.96