

УДК 523.745;550.386

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИОНОСФЕРЫ И ПРИЗЕМНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

© 2011 г. Р. Ю. Лукьянова^{1,2}, А. А. Круглов³, А. В. Франк-Каменецкий¹, А. Л. Котиков³,
Г. Б. Бернс⁴, В. Д. Р. Френч⁴

¹ГУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург,

²Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

⁴Австралийский Антарктический Дивизион, г. Кингстон, Австралия

e-mail: renata@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 25.11.2010 г.

Получены соотношения между среднечасовыми значениями вертикального приземного электрического поля, измеряемого на ст. Восток в Антарктике, и потенциалом ионосферы над станцией. В обоих параметрах рассматривалась та часть, которая контролируется солнечным ветром, соответственно ΔE_z и U_{ext} . Для определения ионосферного потенциала применялись модели конвекции [Weimer, 1995] и [Lukianova and Christiansen, 2006], а также модель по данным системы радаров SuperDARN. Анализ проведен как на примере отдельных дней, так и на всей выборке 170 дней “хорошей погоды” за 1998–2000 гг. Для отдельного дня наилучший коэффициент корреляции (R) между ΔE_z и U_{ext} , полученный по трем моделям, составил соответственно 0.81, 0.80 и 0.88. Общий коэффициент корреляции для всего массива данных составил $R = 0.24–0.32$. В суточном ходе R изменялся от больших значений днем ($R \approx 0.4$) к меньшим значениям ночью ($R \approx 0.1$), при этом в ранние утренние часы наблюдалось некоторое повышение R . Особенности суточного хода R , по-видимому, отражают возможности адекватного описания структуры эквипотенциалей электрического поля ионосферы с помощью крупномасштабных стационарных моделей конвекции. В зависимости от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) R изменяется сложным образом, но общая тенденция состоит в его повышении при переходе от ММП $B_y < 0$ к $B_y > 0$. Этот факт объясняется асимметрией картин конвекции при противоположных знаках B_y .

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле атмосферы очень изменчиво. Напряженность вертикальной компоненты поля (которая обычно много больше горизонтальной) у поверхности Земли достигает нескольких кВ/м при осадках, поземках и облачности. В так называемых “условиях хорошей погоды”, т. е. в отсутствие всякого рода осадков, инея, тумана, нижней облачности и сильного ветра, напряженность атмосферного электрического поля E_z у поверхности составляет около 150 В/м. В направлении этого поля в слабо проводящем воздухе течет электрический ток с плотностью несколько пА/м². Величина E_z меняется во времени и пространстве, причем колебания относительно среднего значения могут составлять от единиц до десятков процентов. Измерения электрического поля, тока и проводимости в условиях хорошей погоды могут дать много полезной информации для изучения электрического состояния атмосферы в рамках концепции глобальной электрической цепи. Грозы и сильно электрифицированные облака действуют как метеорологический (внутриатмосферный) генератор и создают сравнительно медленно меняющуюся во времени (из-за пространствен-

ной/временной неравномерности грозовой активности) разность потенциалов $U_{int} \approx 240$ кВ между ионосферой и поверхностью Земли [Markson, 2007]. Поскольку потенциал на поверхности Земли принимается равным нулю, U_{int} можно называть просто метеорологическим потенциалом ионосферы. Считается, что этот потенциал в заданный момент времени одинаков во всех точках ионосферной оболочки независимо от широты. В высокоширотной части ионосферы (выше 60° геомагнитной широты) на U_{int} накладывается потенциал от другого источника – магнитосферного. Распределение этого ионосферного потенциала, обозначаемого в дальнейшем U_{ext} , соответствует линиям конвекции ионосферной плазмы, которая непосредственно связана с движением плазмы в магнитосфере. Обычно картина конвекции (она же является картиной эквипотенциалей U_{ext}) представляет собой два вихря противоположной направленности с фокусами, расположенными в утреннем и вечернем секторах местного магнитного времени (MLT) на геомагнитной широте примерно 75°. Разность потенциалов поперек полярной шапки ΔU , то есть разность потенциалов в фокусах вихрей, является

важным параметром, характеризующим интенсивность конвекции. Однако, этот параметр не отражает значение U_{ext} в ионосфере над заданной географической точкой поверхности Земли, где находится прибор, измеряющий атмосферное электрическое поле. И структура, и величина U_{ext} в отличие от U_{int} весьма изменчивы во времени и пространстве, поскольку электрические поля магнитосферного происхождения контролируются солнечным ветром, а также проводимостью ионосферы. Таким образом, U_{ext} может меняться в течение суток в достаточно широких пределах, например, ± 50 кВ.

Связь вариаций атмосферного электрического поля с параметрами солнечного ветра, а также с вариациями ионосферного потенциала, показана в работах [Frank-Kamenetsky et al., 2001; Corney et al., 2003; Burns et al., 2005; Kruglov et al., 2010]. Так, в работе [Frank-Kamenetsky et al., 2001] было показано, что на ст. Восток величина вариаций вертикального электрического поля коррелирует с B_z и B_y компонентами ММП. В работах [Burns et al., 2005; Corney et al., 2003] была получена статистически значимая связь величины усредненных вариаций приземного электрического поля в различные часы суток с потенциалом, рассчитанным по модели Веймера [Weimer, 1995].

В высокоширотных областях распределение U_{ext} , в целом, соответствует структуре крупномасштабной квазистационарной конвекции. Кроме того, в ионосфере часто развиваются турбулентные процессы, к которым можно отнести суббури, дуги полярных сияний, нейтральные ветры и другие явления, модифицирующие распределение потенциала на локальном уровне.

В идеализированном случае в любой заданной точке высокоширотной области можно ожидать подобия в изменении атмосферного электрического поля и потенциала ионосферы над этой точкой. Однако, в реальности, не всегда можно получить четкую зависимость. Это обусловлено как проблемами измерения E_z , так и сложностью точного определения постоянно меняющегося под действием ММП потенциала ионосферы. Развитие моделей конвекции, основанных на различных подходах, является важной задачей для повышения достоверности в знании распределения ионосферного потенциала.

Данная работа посвящена изучению соотношений между приземным электрическим полем ΔE_z , измеренным на ст. Восток в Антарктике, и потенциалом ионосферы непосредственно над точкой наблюдения (U_{ext}) как на примере отдельных случаев, так и на большом массиве экспериментальных данных.

2. ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

2.1. Приземное электрическое поле

Основным рассматриваемым параметром является атмосферное электрическое поле, измеряемое

на ст. Восток в Антарктике (геомагнитная широта — 83.6° ; местный геомагнитный полдень соответствует ~ 13 UT). Для исследования вариаций атмосферного электрического поля необходимо, в первую очередь, разделить их на “внутренние”, обусловленные грозным источником, и “внешние”, обусловленные взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой Земли.

В работах [Park, 1978; Roble and Hays, 1978] рассмотрена аналитическая модель передачи потенциала из ионосферы к поверхности Земли и показано, что у поверхности $E_z = -\alpha U$, где E_z — величина полного электрического поля у поверхности, α — коэффициент, характеризующий проводимость атмосферы над точкой наблюдения, $U = U_{int} + U_{ext}$ — суммарный потенциал ионосферы над точкой наблюдения, $E_z = E_{z0} + \alpha U_{ext}$, где E_{z0} — электрическое поле, создаваемое внутриаионосферными источниками.

Таким образом, если мы имеем измеренное электрическое поле E_z и рассчитанный по модели (в данном случае использовалась модель Веймера) потенциал ионосферы U_{ext} , то простой линейно регрессионный анализ позволяет получить грозовую часть измеренного поля E_{z0} и коэффициент регрессии α , величину, пропорциональную проводимости столба атмосферы над точкой наблюдения. В работе [Kruglov et al., 2010] показано хорошее соответствие хода E_{z0} , полученного указанным способом для станции Восток, и кривой Карнеги для различных сезонов года.

В настоящей работе для каждого часа статистическое значение E_{z0} вычиталось из реально измеренной величины E_z (полное вертикальное поле) и полученное значение ΔE_z соотносилось с вариациями ионосферного потенциала над точкой наблюдения, рассчитанными по трем различным моделям конвекции.

2.2. Модели конвекции

Существует несколько эмпирических моделей конвекции ионосферной плазмы, основанных на сопоставлении значений электрического потенциала, измеряемого различными инструментами, с соответствующими значениями ММП [Heppner and Maynard, 1987; Richmond and Kamide, 1988; Weimer, 1995; Dremukhina et al., 1998; Papitashvili and Rich, 2002; Ruohoniemi and Greenwald, 2005]. Модели параметризованы по величине и направлению ММП и сезону года, что позволяет получить усредненные картины конвекции для различных комбинаций параметров.

Одним из новых инструментов, обеспечивших значительный шаг вперед в моделировании электродинамики высокоширотной ионосферы, стала группа европейских низкоорбитальных спутников с полярной орбитой, таких как Magsat, Oersted и Champ. Эти спутники, оснащенные чувствитель-

ными магнитометрами, выполнили большое количество магнитных измерений над E -слоем ионосферы. В результате обработки данных миллиона пролетов, была создана статистическая модель продольных токов (ПТ) для обоих полушарий и разных сезонов, параметризованная по величине и ориентации ММП [Papitashvili et al., 2002]. В дальнейшем, была проведена более детальная параметризация, позволившая получить карты ПТ для любого дня года и значений Bz и Bu с шагом 1 нТл. Соответствующие распределения ПТ в комбинации с распределением проводимости, зависящим от дня года, солнечной ($F10.7$ индекс) и геомагнитной (Kp индекс) активности, служат входными параметрами для численной модели конвекции [Lukianova and Christiansen, 2006]. Модель (называемая в данной работе LC06) является сравнительно новой, полученные результаты находятся в достаточно хорошем согласии с измерениями электрического поля [Lukianova et al., 2008a, б]. В настоящее время она реализована в виде программного средства, которое и использовалось в данной работе для расчета электрического потенциала ионосферы над ст. Восток.

Хорошо известна и часто используется эмпирическая модель конвекции Веймера [Weimer, 1995]. Эта модель построена на основе статистического анализа измерений ионосферного потенциала спутником DE-2 и представляет собой набор коэффициентов сферических гармоник, полученных при регрессионном анализе массива измерений и соответствующих параметров ММП. Картины конвекции по данной модели доступны на сайте НАСА (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/run_weimer.cgi). Модель Веймера (обозначаемая в данной работе как W95) уже использовалась ранее при анализе вариаций вертикального электрического поля на станции Восток, а именно, с ее помощью выделялась грозовая часть поля [Kruglov et al., 2010] и проводилась статистическая оценка вклада внешнего источника (в терминах U_{ext}) в вариации приземного электрического поля [Burns et al., 2005; Corney et al., 2003]. Этим обусловлен выбор модели W95 в качестве основной модели, с результатами которой в нашей работе сравнивается ΔEz .

С точки зрения непосредственных наблюдений ионосферного электрического поля наибольший объем информации можно получить с помощью системы радаров SuperDARN, покрывающих высокоширотные области северного (12 радаров) и южного (8 радаров) полушарий. Синтез реально измеренного поля и восстановленной структуры изолиний в области отсутствия радарного покрытия при помощи статистической модели дает глобальные картины конвекции с высоким временным разрешением. База данных SuperDARN (<http://www.jhuapl.edu/superdarn>) содержит оцифрованные карты конвекции с пространственным разрешением 1° GLat на 1 час MLT и временным разрешением 10 мин. Из соответствующих массивов нетрудно извлечь значение U_{ext} над ст. Восток.

Расчет распределения ионосферного потенциала проводился тремя различными способами: а) по модели конвекции W95 [Weimer, 1995], б) по модели конвекции LC06 [Lukianova and Christiansen, 2006], и в) по модели SuperDARN. Такой подход позволяет решить несколько задач, а именно, а) повысить достоверность определения U_{ext} и его связи с ΔEz , б) увидеть, насколько хорошо согласуются результаты моделирования конвекции, основанные на различных подходах, и в) оценить возможности применения модели LC06, разрабатываемой авторами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Соотношение между ΔEz и U_{ext} для избранных дней

Для того чтобы проследить, насколько точно изменение приземного электрического поля, измеряемого на ст. Восток, может соответствовать изменению ионосферного потенциала над станцией, была проведена селекция дней за период 1998–2000 гг. Избранные дни соответствовали следующим критериям: 1) условия “хорошей погоды” в течение полных суток; 2) максимальное покрытие южнополярной области радарными лучами SuperDARN. Второе условие было определяющим, так как не все радары работают одновременно и, кроме того, эффективность отраженного сигнала зависит от геомагнитных условий. Только для четырех дней с “хорошей погодой”, 21.07.1999, 30.07.1999, 1.04.2000 и 24.04.2000, число наблюдаемых ионосферных векторов за 2 минуты сканирования превышало 400, т.е. покрытие было достаточно плотным.

На рисунке 1 представлены среднечасовые значения ММП Bz и Bu (в GSM координатах) и значения Kp индекса для всех четырех выбранных дней. Значения ММП и индексов получены из базы данных НАСА (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>). Во все дни вертикальная компонента ММП меняла направление в течение суток несколько раз, но в целом, ММП имело преимущественно южное направление. Среднесуточное значение Bu компоненты ММП было преимущественно положительным 21.07.1999 г. и 24.04.2000 г., и отрицательным 01.04.2000 г. 30.07.1999 г. с 07 до 19 UT ММП Bu было, в целом, отрицательным, а в остальные часы — положительным.

На рисунке 2 для каждого из выбранных дней представлены среднечасовые значения приземного электрического поля ΔEz (верхний график для каждого дня) и изменение потенциала U_{ext} в точке над станцией (нижний график для каждого дня), полученное с помощью модели LC06 (линия 1), модели W95 (линия 2) и по данным SuperDARN (линия 3). Для определения величины U_{ext} по моделям рассчитывалась полная картина конвекции для соответствующего часа и условий, представленных на рис. 1 (для модели по данным SuperDARN по 10-минут-

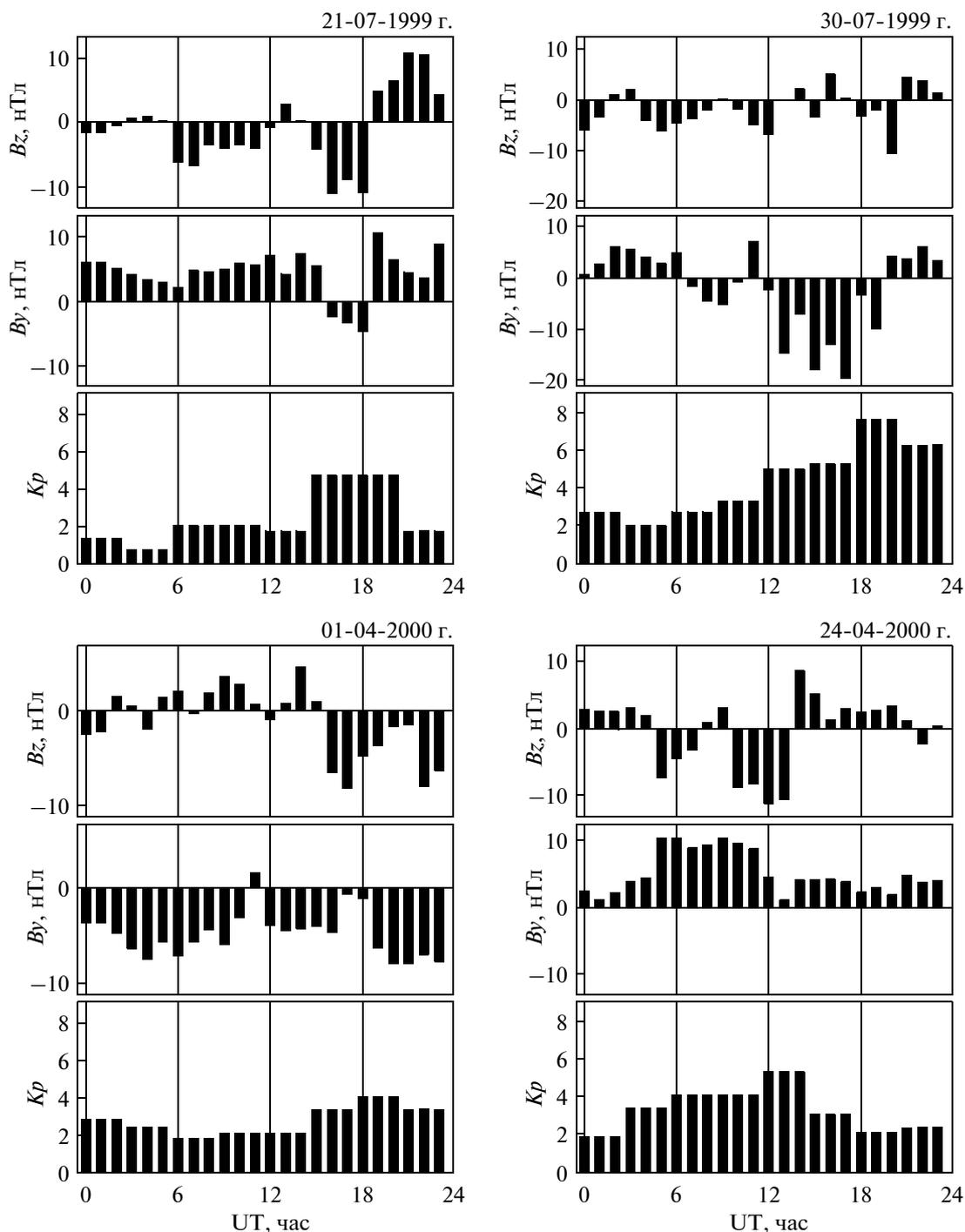


Рис. 1. Часовые значения B_z , B_y ММП и K_p индекса для дней 21.07.1999 г., 30.07.1999 г., 1.04.2000 г. и 24.04.2000 г.

ным данным вычислялись среднечасовые значения)), и затем выбиралось значение потенциала в точке с координатами ст. Восток с учетом разности высот. Величина ΔE_z определялась по методике, описанной в разделе 2.1.

На рисунке 2 можно видеть, что для трех дней, 21.07.1999 г., 30.07.1999 г. и 24.04.2000 г., профили ΔE_z и U_{ext} находятся в очень хорошем согласии, из-

меняясь почти синхронно с точностью до деталей. Три кривые U_{ext} , рассчитанные по разным моделям, также имеют весьма небольшие различия. Однако 01.04.2000 г. в поведении ΔE_z и U_{ext} синхронность отсутствует. Этот день не отличается большой геомагнитной активностью (рис. 1). Сравнив соответствующие графики на рис. 1 и 2, можно заметить, что ионосферный потенциал над станцией

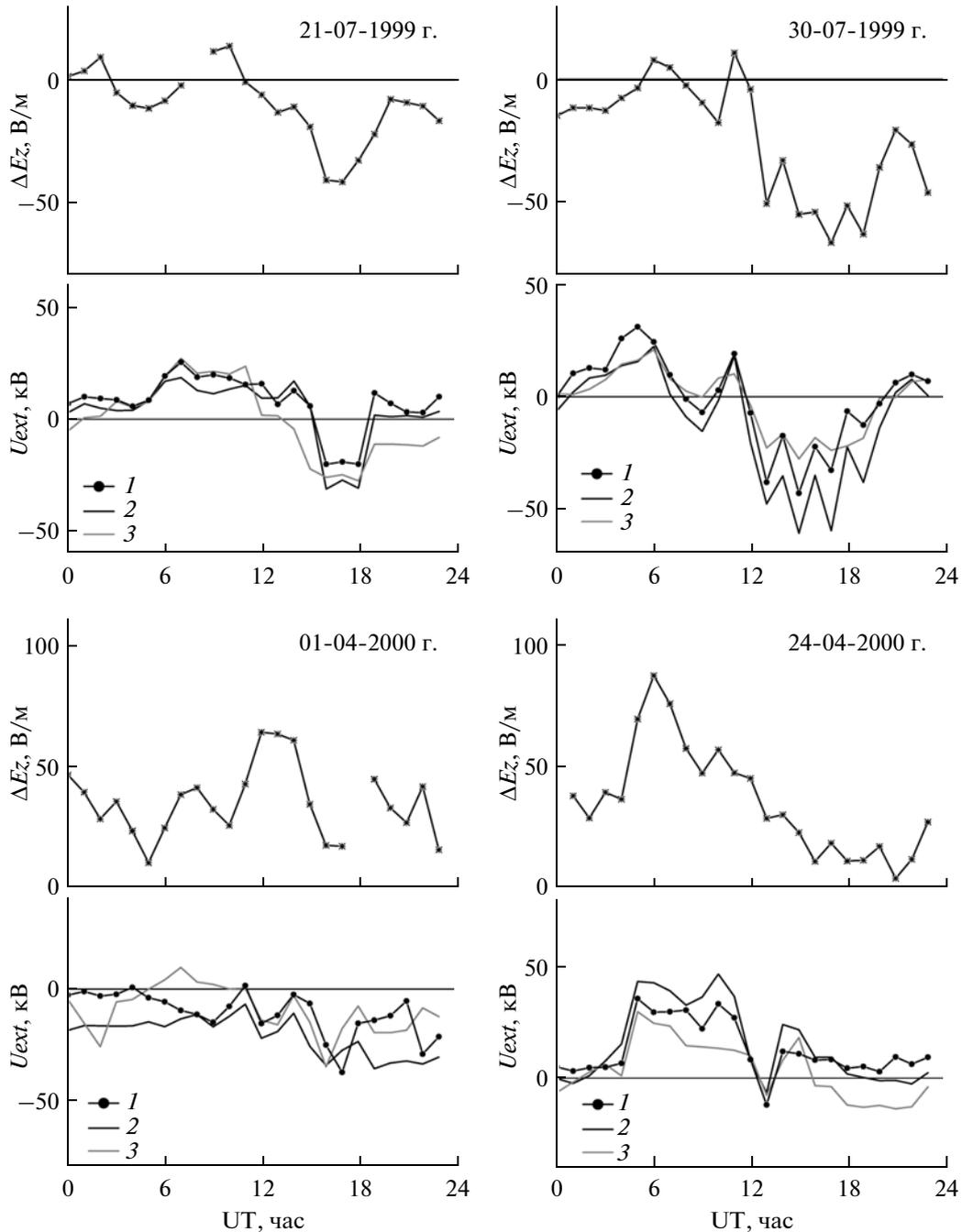


Рис. 2. Для дней 21.07.1999 г., 30.07.1999 г., 1.04.2000 г и 24.04.2000 г: приземное электрическое поле на ст. Восток за вычетом грозовой части ΔE_z (верхние графики) и электрический потенциал ионосферы в точке над станцией U_{ext} (нижние графики). Потенциал получен по трем моделям: LC06 (линия 1), W95 (линия 2) и SuperDARN (линия 3).

следует, в целом, изменению ММП B_u . При этом 01.04.2000, когда в течение всех суток величина B_u компоненты ММП была почти постоянна и составляла около -5 нТл, среднесуточная корреляция между ΔE_z и U_{ext} была значительно ниже, чем в другие дни.

В таблице 1 представлены коэффициенты корреляции между часовыми значениями ΔE_z и U_{ext} .

Из таблицы можно видеть, что для трех дней наблюдалась очень высокая ($R > 0.7$) корреляция между ΔE_z и U_{ext} , тогда как 01.04.2000 г. R не превышал 0.25. При этом все модели дают достаточно похожие результаты. Если исключить день, когда корреляция практически отсутствует, то некоторое преимущество показывает модель SuperDARN. Но напомним, что были выбраны дни наилучшего покрытия области радарными лучами.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между часовыми значениями ΔE_z и U_{ext} для выбранных дней. Значения U_{ext} получены по трем моделям

Дата	Модель		
	LC06	W95	SuperDARN
21.07.1999 г.	0.80	0.78	0.76
30.07.1999 г.	0.78	0.80	0.83
01.04.2000 г.	0.25	0.21	0.09
24.04.2000 г.	0.72	0.81	0.88

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между часовыми значениями U_{ext} , полученными по модели LC06, и значениями, полученным по двум другим моделям

Дата	Модель	
	W95	SuperDARN
21.07.1999 г.	0.95	0.79
30.07.1999 г.	0.96	0.92
01.04.2000 г.	0.45	0.26
24.04.2000 г.	0.91	0.74

С целью сравнения моделей были рассчитаны коэффициенты корреляции между часовыми значениями U_{ext} , полученными по нашей модели LC06, и значениями, полученным по двум другим моделям (табл. 2). Можно видеть, что в отдельных случаях корреляция с моделью W95 достигает 0.96, а с SuperDARN 0.92 (30.07.1999 г), что является вполне хорошим согласием, учитывая то, что сравнение проводится в одной фиксированной точке, проходящей в течение суток под изменяющейся картиной конвекции. Вместе с тем, слабая корреляция не только между ионосферным и приземным электрическим полем, но и между моделями наблюдается 01.04.2000 г. Этот день, однако, не был исключен из группы избранных, так как он иллюстрирует тот факт, что при определенных условиях соответствия между приземным электрическим полем и потенциалом ионосферы не наблюдается. Как показано ниже, это может быть обусловлено формой конвективного вихря, при которой над точкой наблюдения в течение суток U_{ext} всегда отрицателен и меняется мало.

3.2. Статистика за период 1998–2000 гг.

Всего за период 1998–2000 гг. на ст. Восток было 170 дней, удовлетворяющих условиям “хорошей по-

годы”, что составило, соответственно, около 3000 часовых значений E_z , более или менее равномерно распределенных по сезонам года. Рассматривались только те дни, когда условия “хорошей погоды” выполнялись в течение продолжительного времени (>12 часов подряд). На рисунке 3 показано соотношение между часовыми значениями ΔE_z и U_{ext} за весь период, а также линейная аппроксимация связи этих двух параметров. На верхнем графике потенциал ионосферы над станцией получен по модели LC06, а на нижнем – по модели W85. Для полного набора данных коэффициент корреляции R по первой модели оказывается равным 0.24, а по второй – несколько выше ($R = 0.32$). При этом, однако, на верхнем графике линия регрессии ($y = -0.3 + 0.2x$) проходит через нулевую точку, а на нижнем графике соответствующая линия ($y = -5.9 + 0.2x$) смещена в сторону меньших значений U_{ext} , что подразумевает некоторое занижение U_{ext} . Статистическое соотношение между значениями U_{ext} по двум моделям (график не показан) дает коэффициент корреляции $R = 0.69$.

В таблице 3 приведена доля дней от их общего количества, когда коэффициент корреляции между ΔE_z и U_{ext} попадал в диапазоны $R \leq 0$, $0 < R \leq 0.2$, $0.2 < R \leq 0.4$, $0.4 < R \leq 0.6$, $0.6 < R \leq 0.8$ и $R > 0.8$. Можно видеть, что доля дней с высокой ($R > 0.8$) корреляцией составляет не более 8%. Удовлетворительной можно считать корреляцию при $R > 0.4$, и доля таких дней составляет около половины. Однако, для 20% дней $R \leq 0$.

На рисунке 4 представлены значения для каждого месяца года. Для годового хода обе модели конвекции дают согласованные результаты. Можно отметить некоторую тенденцию к увеличению R в летний сезон, однако на фоне большого разброса точек.

На рисунке 5 показан суточный ход R . Можно видеть, что R изменяется от ~ 0.1 в UT = 0 до ~ 0.4 в дневные часы. Сектор повышенной корреляции растянут на несколько часов приблизительно с 10 до 17 UT. Дополнительный узкий максимум наблюдается в 3–4 UT. Плохая корреляция ($R < 0.2$) наблюдается с 21 до 02 UT. Модель W95 дает более высокие значения R , но, что существенно, обе модели дают абсолютно одинаковый профиль суточного хода. Видимо, факторы, которые обуславливают особенности суточного хода R , достаточно хорошо описываются моделями конвекции.

Таблица 3. Распределение числа дней (в % от общего количества) по величине коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} для двух моделей

Модель	Диапазон R					
	$R \leq 0$	$0 < R \leq 0.2$	$0.2 < R \leq 0.4$	$0.4 < R \leq 0.6$	$0.6 < R \leq 0.8$	$R > 0.8$
LC06	20	16	19	20	19	7
W95	19	13	21	16	23	8

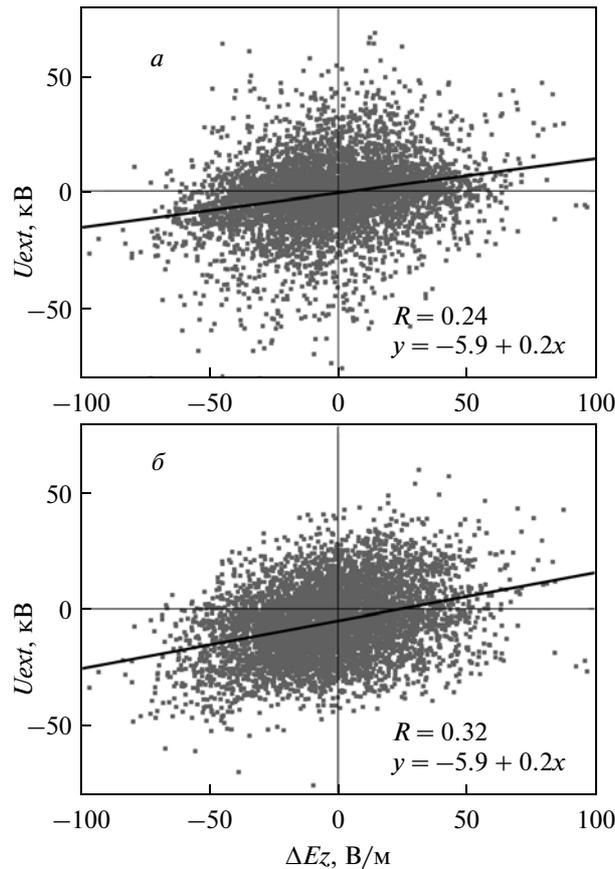


Рис. 3. Соотношение между часовыми значениями ΔE_z и U_{ext} за период 1998–2000 гг. и линейная аппроксимация (жирная линия). Потенциал ионосферы U_{ext} получен по модели LC06 (а) и по модели W95 (б).

3.3. Влияние ориентации ММП на корреляцию между ΔE_z и U_{ext}

В работе [Frank-Kamenetsky et al., 2001] была впервые проанализирована зависимость величины приземного электрического поля от B_z и B_y компонент ММП. Было показано, что это поле возрастает

при изменении B_y от -10 нТл до $+10$ нТл. Эффект B_z выражался в том, что с ростом B_z в утреннем и вечернем секторе величина приземного поля соответственно увеличивалась и уменьшалась.

На рисунке 6 представлено распределение коэффициента корреляции R между часовыми значениями ΔE_z и U_{ext} за все часы “хорошей погоды” в 1998–

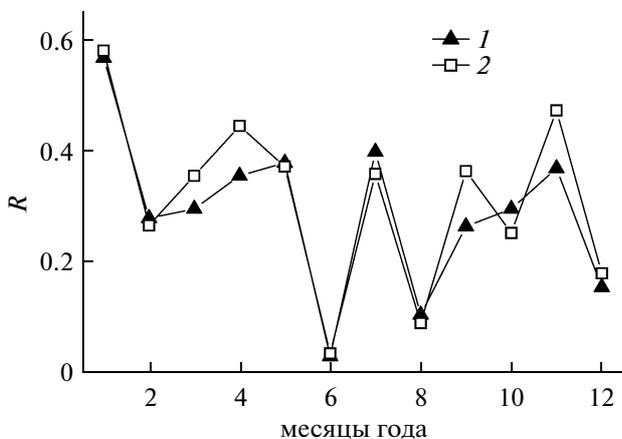


Рис. 4. Годовой ход коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} по модели LC06 (линия 1) и по модели W95 (линия 2).

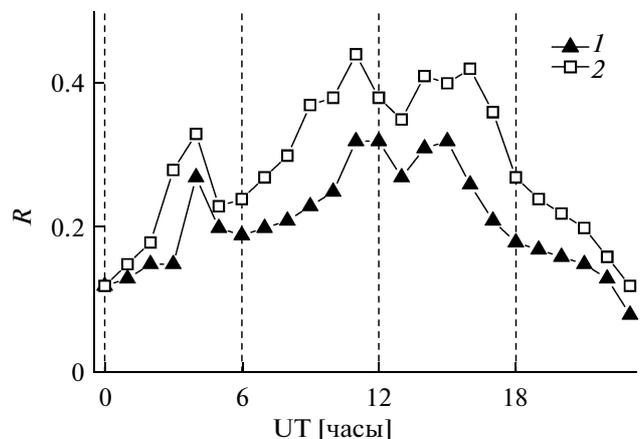


Рис. 5. Суточный ход коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} по модели LC06 (линия 1) и по модели W95 (линия 2).

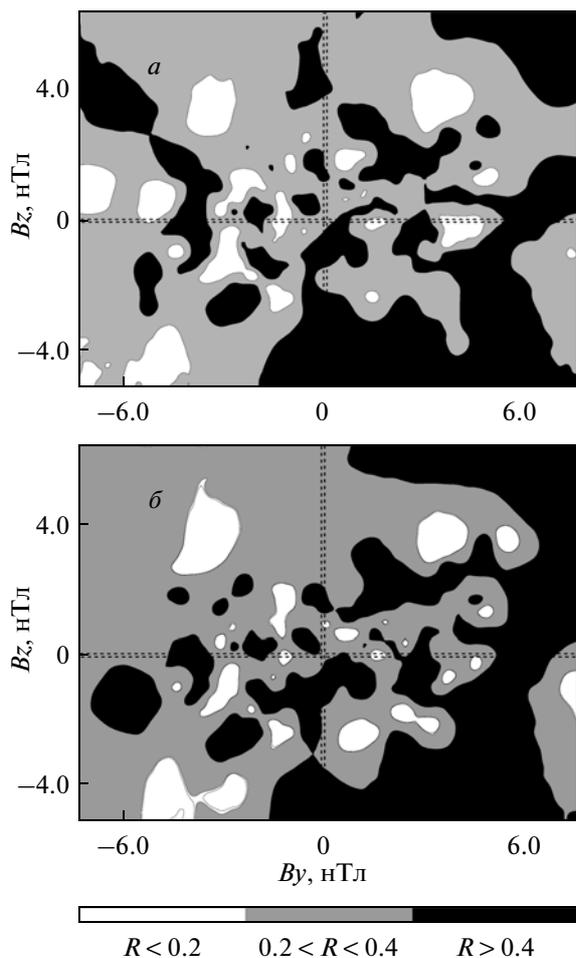


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} от ориентации ММП в плоскости y - z GSM по модели LC06 (а) и по модели W95 (б).

2000 г. (всего около 3000 часов) в зависимости от ориентации ММП в плоскости Y - Z . Диапазон изменения по осям соответствует наименьшему и наибольшему значениям B_y и B_z ММП за рассматриваемый период. Геомагнитная возмущенность не учитывалась. С целью более четкого представления, значения R разделены на три группы: белые области – отрицательная и очень низкая корреляция ($R \leq 0.2$), серые – низкая положительная корреляция ($0.2 < R < 0.4$) и черные – сравнительно хорошая корреляция ($R \geq 0.4$). Верхняя панель соответствует данным модели LC06, а нижняя – модели W95. Можно видеть, что, обе модели демонстрируют когерентные структуры распределения R в зависимости от соотношения B_y и B_z ММП. Области большей или меньшей корреляции, однако, весьма произвольно распределены в плоскости B_y - B_z . Можно заметить лишь, что имеется тенденция к улучшению корреляции при $B_y > 0$, особенно при увеличении интенсивности этой компоненты ММП, когда в южной высокоширотной области развивается более мощный утренний вихрь конвекции.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тот факт, что корреляция между ΔE_z и U_{ext} при $B_y > 0$ выше, чем при $B_y < 0$, может быть обусловлен несимметрией крупномасштабной конвекции. Действительно, картины конвекции при смене знака B_y не отображаются зеркально относительно меридиана полночь/полдень [Papitashvili and Rich, 2002; Ruohoniemi and Greenwald, 2005; Lukianova and Christiansen, 2006]. В южном полушарии, когда $B_y < 0$, вечерний вихрь занимает большую площадь и имеет более круглую форму, чем утренний вихрь при противоположном знаке B_y . Это, в первую очередь, обусловлено градиентом проводимости ночь-день, поскольку неравенство $\Sigma_{\text{день}} > \Sigma_{\text{ночь}}$ вызывает дополнительный зональный холловский ток восточного направления [Мальцев, 1974].

Рисунок 7 иллюстрирует асимметрию картин конвекции при смене знака B_y ММП. Картины рассчитаны по модели LC06. На верхнем графике представлена структура эквипотенциалей в южном полушарии при $B_y < 0$, а на нижнем – при $B_y > 0$, в обоих случаях $B_z < 0$. Внешний широтный круг соответствует геомагнитной широте 50° , а геомагнитная широта ст. Восток (83°) обозначена пунктирной линией. Можно видеть, что при $B_y < 0$ станция в большую часть суток находится почти под одной и той же эквипотенциалью, и U_{ext} меняется мало. В этом случае корреляция ΔE_z и U_{ext} мала или отсутствует. При $B_y > 0$ суточная траектория станции проходит под многими эквипотенциальями, вследствие чего U_{ext} существенно меняется. Структура эквипотенциалей такова, что в области над станцией образуется разность потенциалов на масштабах 100–200 км. Согласно теории [Park, 1976] это именно те условия, когда можно ожидать хорошей корреляции между ΔE_z и U_{ext} .

Профиль суточного хода общего коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} (для всех ММП и сезонов) достаточно плавно изменяется от больших значений днем к меньшим значениям ночью. Ночной минимум свидетельствует о том, что в поздне-вечерние и ночные UT часы, когда станция находится также и в ночном MLT-секторе, в ионосфере над ней доминируют турбулентности, обусловленные процессами в хвосте магнитосферы. Образующиеся при этом локальные структуры, по-видимому, плохо описываются стационарными моделями конвекции. В этой связи следует отметить, что в работах [Клейменова и др., 2008; 2010] указывается на то, что усиление межпланетного электрического поля во время главной фазы магнитной бури, развитие магнитосферных суббурь и вторжение энергичных электронов в ночную авроральную ионосферу могут приводить к значительным возмущениям в атмосферном электрическом поле. Интересным фактом является повышение R в ранние утренние часы, хорошо заметное в профиле суточного хода, рассчитанном по обоим моделям. Такое повышение, вероятно, отра-

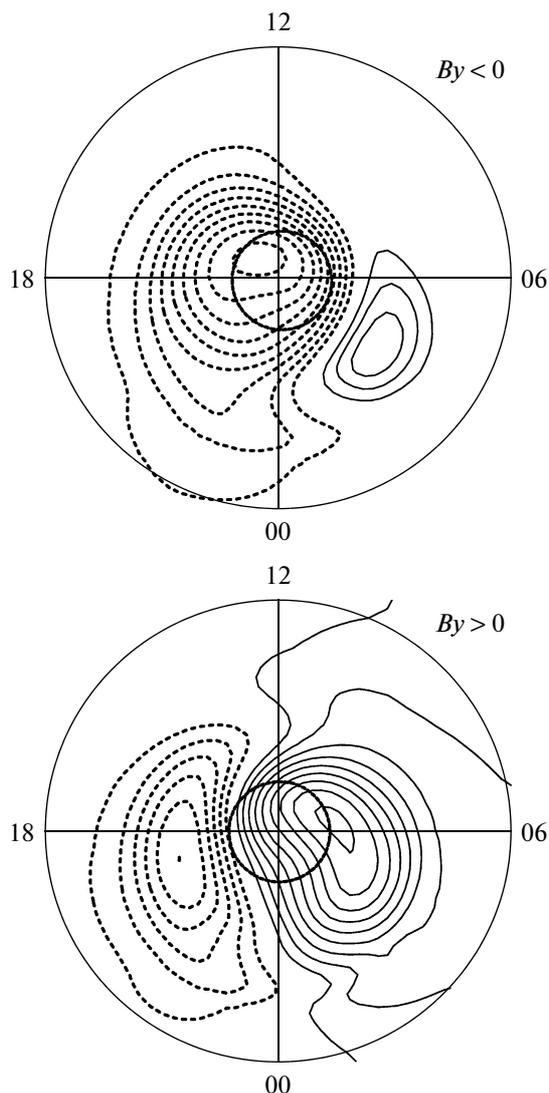


Рис. 7. Картина конвекции в южном полушарии при $B_y < 0$ (а) и $B_y > 0$ (б), в обоих случаях $B_z < 0$. Внешний круг соответствует геомагнитной широте 50° . Геомагнитная широта ст. Восток (-83.5°) обозначена пунктирной линией.

жает тот факт, что сектор 02–03 MLT является относительно свободным от локальных возмущений, и здесь опять начинает доминировать крупномасштабная конвекция. Кроме того, в 15 UT на фоне уже наметившегося общего ослабления корреляционной связи ΔE_z и U_{ext} в послеполуденный час можно видеть кратковременное увеличение R . Эти два MLT сектора, 03 и 15 UT, находятся вблизи фокусов утреннего и вечернего вихрей конвекции, где величина потенциала максимальна, и поэтому можно ожидать более четкого проявления связи между ΔE_z и U_{ext} . Выявление степени влияния различных компонент ММП в различные сезоны и часы суток требует более подробного анализа, который будет проведен в дальнейшем.

Что касается верификации нашей модели LC06 относительно независимых экспериментальных

данных по приземному электрическому полю, то на примере выбранных дней можно видеть удовлетворительное согласие ее результатов с результатами модели конвекции W95 и SuperDARN. Общий (за весь период измерений) коэффициент корреляции между ΔE_z и U_{ext} в случае, если последний параметр рассчитан по модели LC06, несколько ниже (0.24), чем если он рассчитан по модели W95 (0.32). Однако, регрессионная линия проходит практически через начало координат, тогда как для модели W95 она смещена примерно на 5 кВ в сторону меньших U_{ext} . В целом, можно считать, что наша модель пригодна для оценки ионосферного потенциала.

5. ВЫВОДЫ

Подтверждается, что в южной полярной области существует связь между вариациями вертикальной

компоненты приземного электрического поля и электрическим потенциалом ионосферы, контролируемым ММП. Получены соотношения между часовыми значениями приземного электрического поля на станции Восток (ΔE_z) и потенциалом ионосферы над станцией (U_{ext}) как на примере четырех выбранных дней, так и на всем наборе дней с “хорошей погодой” за 1998–2000 гг. Для определения ионосферного потенциала применялись модели конвекции: [Weimer, 1995] и [Lukianova and Christiansen, 2006], а также модель по данным SuperDARN. Наилучший коэффициент корреляции R для отдельного дня составил 0.81, 0.80 и 0.88, соответственно по трем моделям. Общий коэффициент корреляции для всего массива данных составил 0.32 (по [Weimer, 1995]) и 0.24 (по [Lukianova and Christiansen, 2006]).

Показано, что профиль суточного хода коэффициента корреляции между ΔE_z и U_{ext} плавно изменяется от больших значений днем к меньшим значениям ночью в диапазоне $R = 0.1–0.4$. В зависимости от ориентации ММП в плоскости $Y–Z$ GSM коэффициент корреляции между ΔE_z и U_{ext} изменяется сложным образом, но общая тенденция состоит в повышении R при переходе от $B_y < 0$ к $B_y > 0$. Этот факт объясняется асимметрией картин конвекции при противоположных знаках B_y .

Оборудование и программное обеспечение комплекса для исследования атмосферной электрической цепи разработаны в рамках проекта, утвержденного Австралийским антарктическим научно-консультативным комитетом (AAS проект № 974). Работа (РЛ) частично поддержана РФФИ (грант № 09-05-00232).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 5. С. 650–659. 2008.
- Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Михновски С., Кубицки М. Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 1. С. 51–60. 2010.
- Мальцев Ю.П. Влияние ионосферной проводимости на систему конвекции в магнитосфере // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 14. № 1. С. 154–155. 1974.
- Bering, E. A. The global circuit: Global thermometer, weather by-product or climate modulator? // Rev. Geophys. 33. P. 845–851. 1995.
- Burns G.B., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Reddell B.D. Inter-annual consistency of bi-monthly differences in diurnal variations of the ground-level, vertical electric field // J. Geophys. Res. V. 110. D10106. doi:10.1029/2004JD005469. 2005.
- Dremukhina L.A., Levitin A.E., Papitashvili, V.O. Analytical representation of IZMEM model for near-real time prediction of electromagnetic weather // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. P. 1517–1529. 1998.
- Corney R.C., Burns G.B., Michael K., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Papitashvili V.O., Breed A.M., Duldig M.L. The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. P. 345–357. 2003.
- Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Burns G.B., Papitashvili V.O. Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 106(A1). P. 179–190. 2001.
- Heppner J.P., Maynard, N.C. Empirical high-latitude electric field model // J. Geophys. Res. V. 92. P. 4467–4482. 1987.
- Kruglov A.A., Frank-Kamenetsky A.V., Burns G., French J., Morozov V.N. On the connection between variations of atmospheric electric field as measured at ground surface in the Central Antarctica and ionospheric potential // Proc. 33d Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, March 2–5. 2010 (in press)
- Lukianova R., Christiansen F. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents // J. Geophys. Res. V. 111. A03213. doi:10.1029/2006JA011950. 2006.
- Lukianova R., Kozlovsky A., Turunen T. Comparison and validation studies related to the modeling ionospheric convection and the European incoherent scatter observations in the polar cap // Intern. J. Geomagnetism Aeronomy. V. 7. № 3. GI3005. doi:10.1029/2007GI000169. 2008a.
- Lukianova R., Hanuise C., Christiansen F. Asymmetric distribution of the ionospheric electric potential in opposite hemispheres as inferred from SuperDARN observations and the FAC-based convection model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. P. 2324–2335. 2008b.
- Markson R. The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years, *Bull. Am. Met. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-88-2-223, 223–241, 2007
- Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T. A new model of field aligned currents derived from high precision satellite magnetic field data // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 14. P. 1683–1686. 2002.
- Papitashvili V.O., Rich F.J. High-latitude ionospheric convection models derived from Defense Meteorological satellite Program ion drift observations and parameterized by the interplanetary magnetic field strength and direction // J. Geophys. Res. V. 107(A8), P. 1198–1215. 2002.
- Park C. G. Downward mapping of high-latitude ionospheric electric fields to the ground // J. Geophys. Res. V. 81. P. 168–176. 1976.
- Richmond A.D., Kamide Y. Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: Technique // J. Geophys. Res. V. 93. P. 5741–5765. 1988.
- Roble R. G., Hays P.B. Electric coupling between the upper and lower atmosphere // Proc. Symp. on Solar-Terrestrial Influences on Weather and Climate, ed. McCormac B. and Seliga T. 223. P. 7247–7256. 1978.
- Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A. Dependencies of high-latitude plasma convection: Consideration of IMF, seasonal, and UT factors in statistical patterns // J. Geophys. Res. V. 110. A09204. doi:10.1029/2004JA010815. 2005.
- Weimer D.R. Models of high-latitude electric potentials derived with a least error fit of spherical harmonic coefficients // J. Geophys. Res. V. 100(A19). P. 595–611. 1995.