

УДК 550.387.4

ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ И ПОТЕНЦИАЛ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

© 2012 г. А. В. Франк-Каменецкий¹, А. Л. Котиков², А. А. Круглов¹, Г. Барнс³, Н. Г. Клейменова⁴,
О. В. Козырева⁴, М. Кубицки⁵, А. Оджимек⁵

¹ФГБУ Научно-исследовательский институт Арктики и Антарктики, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн РАН, г. Санкт-Петербург

³Австралийский Антарктический Дивизион, г. Кингстон, Австралия

⁴Институт физики Земли РАН, г. Москва

⁵Институт геофизики Польской Академии Наук, г. Варшава

e-mail: al_frank@aari.ru

Поступила в редакцию 18.11.2011 г.

Выполнен анализ одновременных наблюдений вариаций приземного электрического поля (E_z), нормированного на среднесуточное значение, в различных областях высоких широт в условиях умеренной геомагнитной возмущенности ($K_p \sim 3$). Данные наблюдений E_z получены при “хорошей погоде” в южной полярной шапке на антарктической ст. Восток ($\Phi' = -83.5^\circ$), и в северном полушарии на арктической obs. Хорзунд ($\Phi' = 74.0^\circ$) на архипелаге Шпицберген вблизи полярной границы аврорального овала. Установлено, что в полярной шапке (ст. Восток) вариации атмосферного электрического поля контролируются вариациями потенциала ионосферы над точкой наблюдения с высоким коэффициентом корреляции ($R \sim 0.7-0.9$). В obs. Хорзунд ситуация сложнее. В интервалы, когда Хорзунд находился в области западного электроджета эта корреляция обычно была положительной с $R \sim 0.60-0.85$, а когда Хорзунд оказывался в области восточного электроджета корреляция могла стать отрицательной с $R \sim 0.7-0.8$. Обычно в такие интервалы полярнее Хорзунда регистрировался западный электроджет, и по данным радаров SuperDARN Хорзунд располагался в области отрицательного вихря полярной ионосферной конвекции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно существующим моделям [Park, 1976; Neys and Roble, 1979; Морозов и Трошичев, 2008], приземное электрическое поле пропорционально разности потенциалов между ионосферой и поверхностью Земли в точке наблюдения. Результаты многолетних прямых измерений дают среднюю величину разности потенциалов 254 кВ [Markson, 2007]. Основной вклад в эту величину вносят грозы и сильно электризованные облака. Эту величину (U_{int}) принято считать одинаковой в заданный момент времени независимо от широты точки наблюдения, за исключением высокоширотных областей. В высокоширотной ионосфере на U_{int} накладывается потенциал от магнитосферного источника (U_{ext}), контролируемого параметрами солнечного ветра и проводимостью ионосферы [Weimer, 1995]. U_{ext} может быть рассчитано по модели Веймара [Weimar, 2005]. Поскольку потенциал на поверхности Земли принимается равным нулю, то суммарный потенциал ионосферы ($U_i = U_{ext} + U_{int}$) можно называть просто потенциалом ионосферы.

В работе [Frank-Kamenetsky et al., 2001] показано, что вариации приземного электрического поля (E_z) в полярной шапке на ст. Восток в значительной степени контролируются межпланетным магнитным полем (ММП) и, соответственно, потенциалом ионосферы над точкой наблюдения [Tinsley et al., 1998; Corney et al., 2003; Burns et al., 2005; Kruglov et al., 2010; Odzimek et al., 2011]. Измерения атмосферного электрического поля в высоких широтах позволили установить связь вариаций E_z с магнитосферными суббурями [Бандилет и др., 1986; Michnowski et al., 1991; Belova et al., 2000; Никифорова и др., 2003; Клейменова и др., 2010]. В то же время, наблюдения вариаций E_z на границе полярной шапки в obs. Хорзунд (Шпицберген) показали отсутствие значимой связи между E_z и разностью потенциалов поперек полярной шапки [Клейменова и др., 2011].

Целью данной работы является исследование эффектов внешнего источника (U_{ext}) в вариациях приземного электрического поля (E_z) в магнитовозмущенное время ($K_p \sim 3$) в различных областях высоких широт. Использовались данные наблюдений E_z в obs. Хорзунд (HOR, $\Phi' = 74.0^\circ$,

$\Lambda' = 110.5^\circ$) на архипелаге Шпицберген и на ст. Восток в Антарктиде ($VOS, \Phi' = -83.5^\circ, \Lambda' = 55^\circ$). Если ст. Восток всегда находится в центральной части южной полярной шапки, то obs. Хорзунд в условиях сильной магнитной возмущенности ($Kp \sim 5$) проецируется в приграничную область северной полярной шапки, а в остальное время — в область аврорального овала [Клейменова и др., 2010]. Разница в местном магнитном времени (MLT) в этих точках составляет 3.5 ч.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использованы данные одновременных наблюдений вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (Ez) в польской obs. Хорзунд на арх. Шпицберген и на ст. Восток в Антарктиде, полученные в условиях так называемой “хорошей погоды”, т.е. в отсутствии сильного ветра, осадков и пр. На ст. Восток условия “хорошей погоды” выполняются более, чем в 30% времени [Frank-Kamenetsky et al., 2001], в то время как в obs. Хорзунд условия “хорошей погоды” наблюдаются значительно реже и составляют не более 15% непрерывных наблюдений [Клейменова и др., 2010].

Одной из проблем в исследовании вариаций атмосферного электрического поля является задача разделения источников этих вариации на внешние и внутренние. Все существующие модели генерации атмосферного электрического поля [Park, 1976; Neys and Roble, 1979; Морозов и Трошичев, 2008] показывают, что электрическое поле у поверхности Земли пропорционально потенциалу ионосферы над точкой наблюдения (потенциал поверхности Земли считается равным нулю). В работе [Kruglov et al., 2010] показано, что потенциал ионосферы (U_i) может быть представлен как $U_i = U_{ext} + U_{int}$, где U_{ext} — потенциал внешних источников, рассчитанный по модели Веймара [Weimar, 2005], а U_{int} — потенциал от внутренних (грозовых или метеорологических) источников. Полагая, $Ez = Ez_0 + \alpha U_{ext}$, где $Ez_0 = \alpha U_{int}$ — электрическое поле, создаваемое грозовыми генераторами, а αU_{ext} — поле, создаваемое внешними генераторами, простой линейно-регрессионный анализ позволяет получить грозовую часть измеренного поля (Ez_0) и коэффициент регрессии α — величину, пропорциональную проводимости столба атмосферы над точкой наблюдения. Этим методом для февраля и мая 2007 года были рассчитаны кривые суточного хода Ez_0 для ст. Восток (недостаточное число дней с хорошей погодой не позволяет рассчитать аналогичные кривые для Хорзунда), которые в дальнейшем, после нормировки на среднесуточное значение (Ez_{int}), были использованы как для ст. Восток, так и для obs. Хорзунд. Естественно, что грозовая составляющая для ст. Восток и для obs. Хорзунд

может существенно отличаться по величине, однако, единый грозовой генератор, определяющий Ez_{int} , одинаково воздействует, как на ионосферу северного, так и южного полушарий. Поэтому нормированная кривая суточного хода (аналог кривой Карнеги) должна быть идентична для Восток и Хорзунда.

Для анализа были выбраны 3 умеренно магнитовозмущенных дня 2007 года: 12 февраля ($\Sigma Kp = 14$), 7 мая ($\Sigma Kp = 21_+$) и 25 мая ($\Sigma Kp = 22_+$) с “хорошей погодой” как в obs. Хорзунд, так и на ст. Восток. В эти дни obs. Хорзунд находилась либо в авроральном овале, либо на его полярной границе (в магнитовозмущенное время), что подтверждается данными OVATION, [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html], а ст. Восток постоянно находилась в центре полярной шапки. Это хорошо видно на рис. 1, где приведено положение аврорального овала в северном и южном полушариях по данным модели OVATION, подтвержденное спутниковыми пролетами вблизи obs. Хорзунд и Восток для 12 февраля и 25 мая в 15–17 UT.

На рисунке 2 приведены осредненные 5-ти минутные данные наблюдений атмосферного электрического поля за выбранные дни, нормированные на среднесуточное значение (Ez_n), и вариации магнитного поля на станции Восток (H составляющая) и в obs. Хорзунд (X составляющая). Нормированные кривые суточного хода Ez_{int} (аналог кривой Карнеги) показаны на рис. 2 жирными линиями.

Из рисунка 2а следует, что 12 февраля 2007 г. геомагнитные возмущения как на ст. Восток (левые графики), так и в Хорзунде (правые графики) начались около 08 UT и продолжались до конца суток. В этот же период наблюдались интенсивные вариации приземного электрического поля. 7 мая 2007 г. (рис. 2б) ($\Sigma Kp = 21_+$) как в Хорзунде, так и на Востоке геомагнитные возмущения начались также около 08 UT и продолжались до ~20 UT. В это же время можно видеть заметные вариации атмосферного электрического поля на ст. Восток. Возмущения приземного электрического поля в obs. Хорзунд начались раньше (около 04 UT). 25 мая 2007 г. (рис. 2в) ($\Sigma Kp = 22_+$) как вариации магнитного поля, так и электрического поля наблюдались в течение всего дня с наибольшей интенсивностью в интервале 07–20 UT. Именно в этот период времени в электрическом поле, как на Востоке, так и в Хорзунде можно видеть самые интенсивные вариации.

Для исключения влияния грозового генератора (U_{int}) были рассчитаны значения $\Delta Ez_n = Ez_n - Ez_{int}$, которые затем были сопоставлены с величиной потенциала ионосферы, возникающего в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли (U_{ext}). Потенциал рассчитан с шагом 20 мин

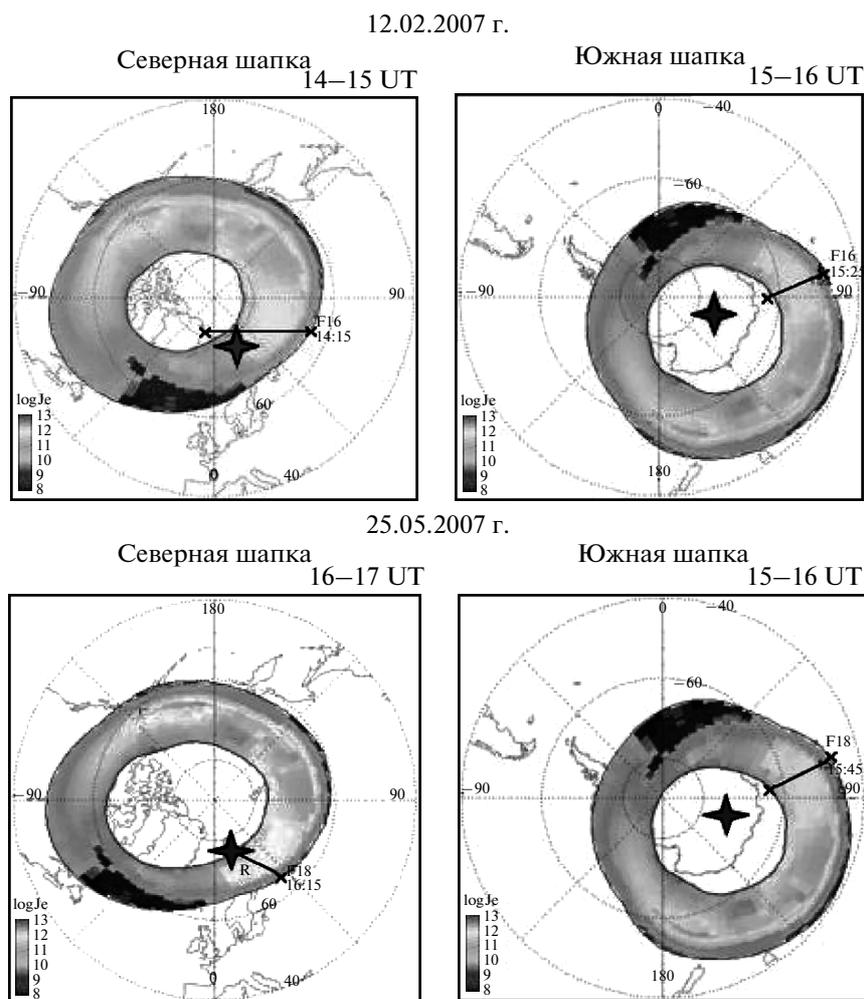


Рис. 1. Положение ст. Восток и obs. Хорзунд относительно овала сияний 12 февраля и 25 мая 2007 г.

как для северного, так и для южного полушария по модели Веймера [http://ccmc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/run_weimer.cgi]. Параметры солнечного ветра, необходимые для расчета распределения электрического потенциала в ионосфере, получены из [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>].

На рисунке 3 приведены результаты сравнения вариаций ΔE_{zn} с величиной потенциала над точкой наблюдения. Хорошо видно, что в полярной шапке (ст. Восток) наблюдается хорошая корреляция вариаций электрического поля с вариациями ионосферного потенциала. Коэффициент корреляции для всего дня менялся от 0.47 (25.05.2007) до 0.70 (07.05.2007). В obs. Хорзунд однозначного соответствия ΔE_{zn} и U_{ext} не наблюдалось. Коэффициент корреляции за весь день не превышал 0.18 (25.05.2007).

В obs. Хорзунд значимая корреляция ΔE_z и U_{ext} наблюдалась только в отдельные временные интервалы. По всей вероятности, отсутствие связи ΔE_z и U_{ext} в Хорзунде объясняется влиянием

интенсивных ионосферных и продольных токов, возникающих на широте этой станции во время магнитных возмущений и не учитываемых в модельных расчетах потенциала ионосферы.

Для учета возможного влияния ионосферных токов (электроджетов) и трехмерных токовых систем в области каспа на вариации электрического потенциала в высоких широтах (obs. Хорзунд) нами были использованы данные магнитометров IMAGE [http://www.ava.fmi.fi/image/jpg/jpg_form.html]. Алгоритм восстановления меридиональных профилей ионосферных токов основан на решении обратной задачи пересчета вариаций компонент магнитного поля (X, Y, Z) на поверхности Земли в горизонтальные токи на высотах ионосферы (~100 км). Методика расчетов профилей ионосферных токов по данным меридиональной цепочки магнитных вариационных станций [Котиков и др., 1991, Kotikov et al., 1993] позволяет с высоким пространственным (~50 км) и временным (~10 с) разрешением проследить динамику ши-

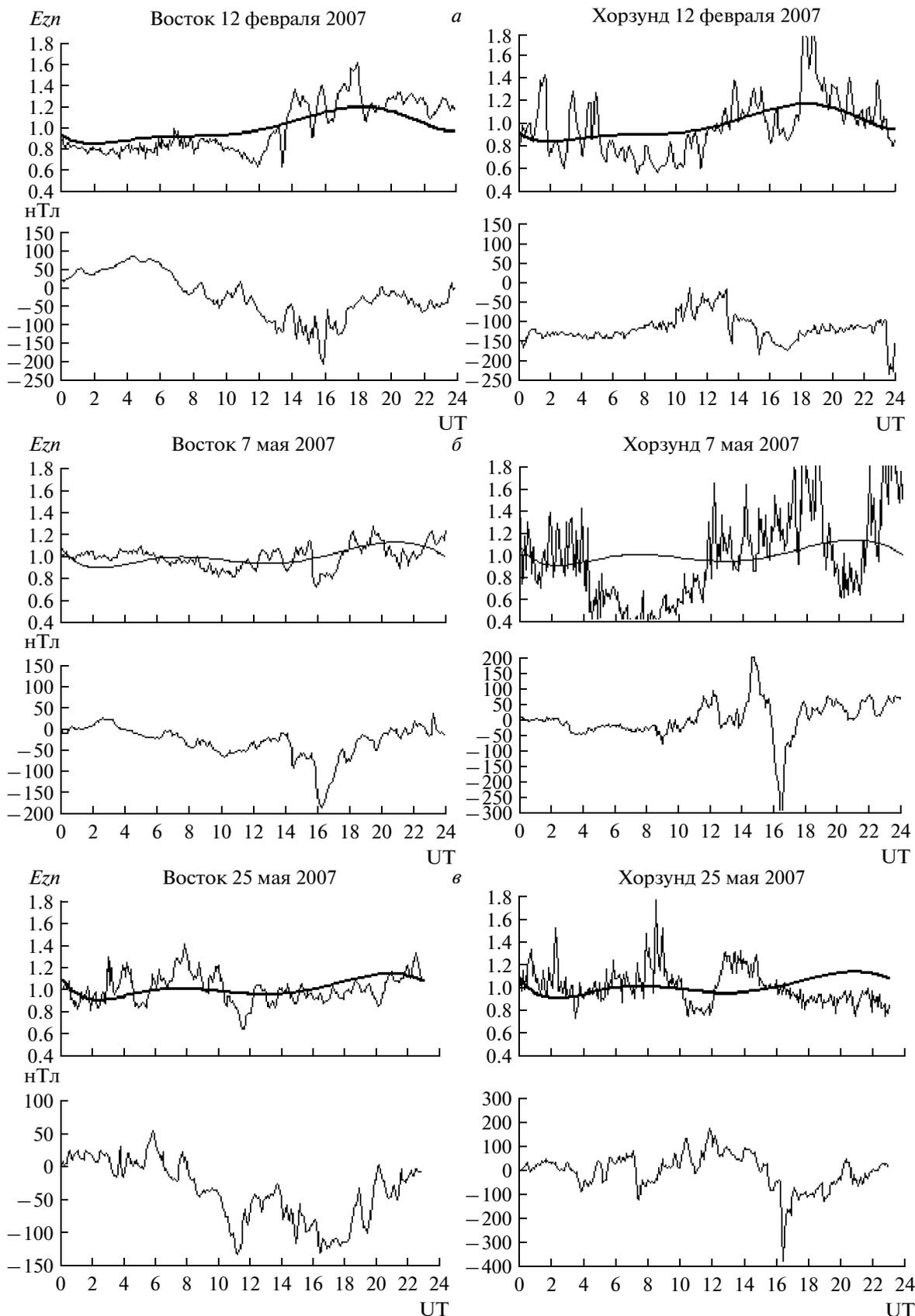


Рис. 2. Нормированные значения E_z и вариации горизонтальной составляющей магнитного поля на ст. Восток и в обс. Хорзунд: *a* – 12.02.2007 г., *б* – 07.05.2007 г., *в* – 25.05.2007 г. Жирной линией показана среднемесячная кривая грозовой части приземного электрического поля (E_{z0}).

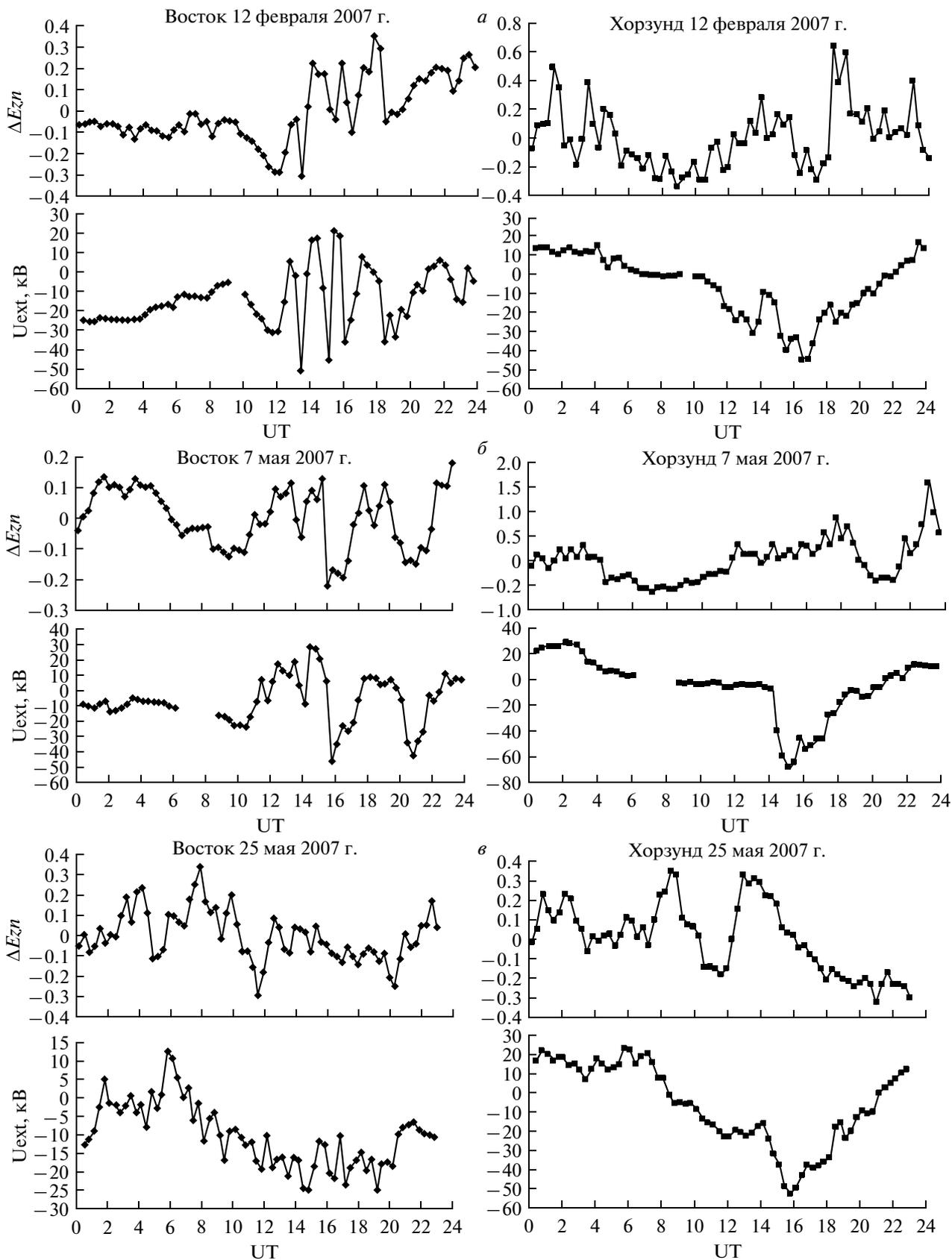


Рис. 3. Суточный ход вариаций $\Delta E_{zп}$ и потенциала U_{ext} для ст. Восток и обс Хорзунд: а – 12.02.2007 г., б – 07.05.2007 г., в – 25.05.2007 г.

ротной компоненты токов в интервале широт от 54 до 78° исправленной геомагнитной широты. Обс. Хорзунд находится в высокоширотной части меридиональной цепочки станций IMAGE. Рассчитанные профили позволяют локализовать области втекающих и вытекающих продольных токов [Котиков и Шишкина, 1997], что, в свою очередь, позволяет отслеживать локальные экстремумы электрического потенциала ионосферы. Очевидно, что втекающие токи увеличивают потенциал ионосферы, а вытекающие уменьшают.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов плотности токов (верхняя панель) и вариации атмосферного электрического поля в Хорзунде (нижняя панель) для исследуемых дней. Отрицательным значениям плотности ионосферных токов соответствует ток западного направления (изолинии плотности тока показаны сплошной линией), положительным — восточного (штриховые линии). Прямоугольниками с различной штриховкой на широте обс. Хорзунд выделены интервалы с положительной и отрицательной корреляцией

На рисунке 4 видно, что 12.02.2007 г. (рис. 4а) с 00 до 07 UT и с 15:00 до ~18:30 UT на широте Хорзунда регистрировались токи западного направления. В эти интервалы коэффициенты корреляции вариаций приземного электрического поля (ΔEzn) и рассчитанного потенциала ионосферы (U_{ext}) были положительными и составляли 0.35 и 0.51 соответственно. В интервалы 07–15 UT и 18:30–23.00 UT над Хорзундом наблюдались токи восточного направления. Коэффициенты корреляции в это время были отрицательными и составляли -0.74 и -0.33 соответственно.

Подобная картина наблюдалась и 07.05.2007 г. (рис. 4б). С 00 до 9:30 UT и с 16:00 до 18:30 UT над Хорзундом регистрировался западный ток. Коэффициенты корреляции в эти интервалы составляли 0.85 и 0.61. С 9:30 до 16 UT Хорзунд попадал в область восточного тока. В этот период времени коэффициент корреляции был отрицательным (-0.42). С 18:30 до 24:00 UT на широте Хорзунда наблюдался очень слабый восточный ток (<1 А/м), коэффициент корреляции был 0.60.

В событии 25.05.2007 г. (рис. 4в) значимые положительные значения коэффициента корреляции (0.64 и 0.70) отмечались в интервалы времени 00–5:30 UT и 7:30–11:30 UT, когда Хорзунд находился под интенсивным западным током (>10 А/м). В интервале 11:30–15:00 UT над Хорзундом располагался ток восточного направления, и корреляция ΔEzn с U_{ext} практически отсутствовала ($R = 0.08$). С 15 до 20 UT максимум западного тока сместился к экватору. В этом интервале коэффициент корреляции ΔEzn и U_{ext} стал отрицательным (-0.82).

Коэффициенты корреляции (R) ΔEzn с потенциалом ионосферы над точкой наблюдения (U_{ext})

Дата	Время UT	Восток R	Хорзунд R
12.02.2007 г. $\Sigma Kp = 14$	0:00 – 7:00	–0.04	0.35
	7:00–15:00	0.87	–0.74
	15:00–18:30	0.51	0.51
	18:30–23:00	0.75	–0.33
7.05.2007 г. $\Sigma Kp = 21_+$	0 – 9:30	0.79	0.85
	9:30–16:00	0.93	–0.42
	16:00–18:30	0.95	0.61
	18:30–24:00	0.81	0.60
25.05.2007 г. $\Sigma Kp = 22_+$	0 – 5:30	–0.01	0.64
	7:30–11:30	0.71	0.70
	11:30–15:00	0.05	0.08
	15:00–20:00	0.08	–0.82
	20:30–24:00	–0.39	0.15

К сожалению, отсутствие достаточного количества магнитных данных в полярной шапке южного полушария не позволили провести аналогичные исследования распределения электроструй и продольных токов в окрестности ст. Восток.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты анализа связи вариаций электрического поля (ΔEzn) с величиной потенциала, создаваемого внешними источниками в ионосфере (U_{ext}) над ст. Восток и обс. Хорзунд, приведены в таблице. Временные интервалы, для которых вычислялись коэффициенты корреляции, были выбраны в соответствии с расположением западного и восточного ионосферного тока над обс. Хорзунд (рис. 4) для каждого из анализируемых дней. Как видно из таблицы, в подавляющем большинстве временных интервалов вариации ΔEzn на ст. Восток обусловлены вариациями потенциала ионосферы (U_{ext}). Низкий коэффициент корреляции (0.47) для всего дня 25 мая может быть обусловлен тем фактом, что в этот день V_y компонента ММП была преимущественно отрицательной. В работе [Лукьянова и др., 2011] показано, что при V_y ММП < 0 антарктическая станция Восток большую часть суток находится почти под одной и той же эквипотенциалью, и U_{ext} меняется мало. В этом случае корреляция ΔEzn и U_{ext} мала или отсутствует. При V_y ММП > 0 суточная траектория станции проходит под многими эквипотенциальями, вследствие чего U_{ext} меняется значительно.

Заметим, что 25 мая в интервале 07:30–11:30 UT коэффициент корреляции как в Хорзунде, так и на Востоке был большим положительным (~ 0.7). В этот интервал в 10–12 UT вблизи ст. Восток наблюдалась небольшая суббура с амплитудой око-

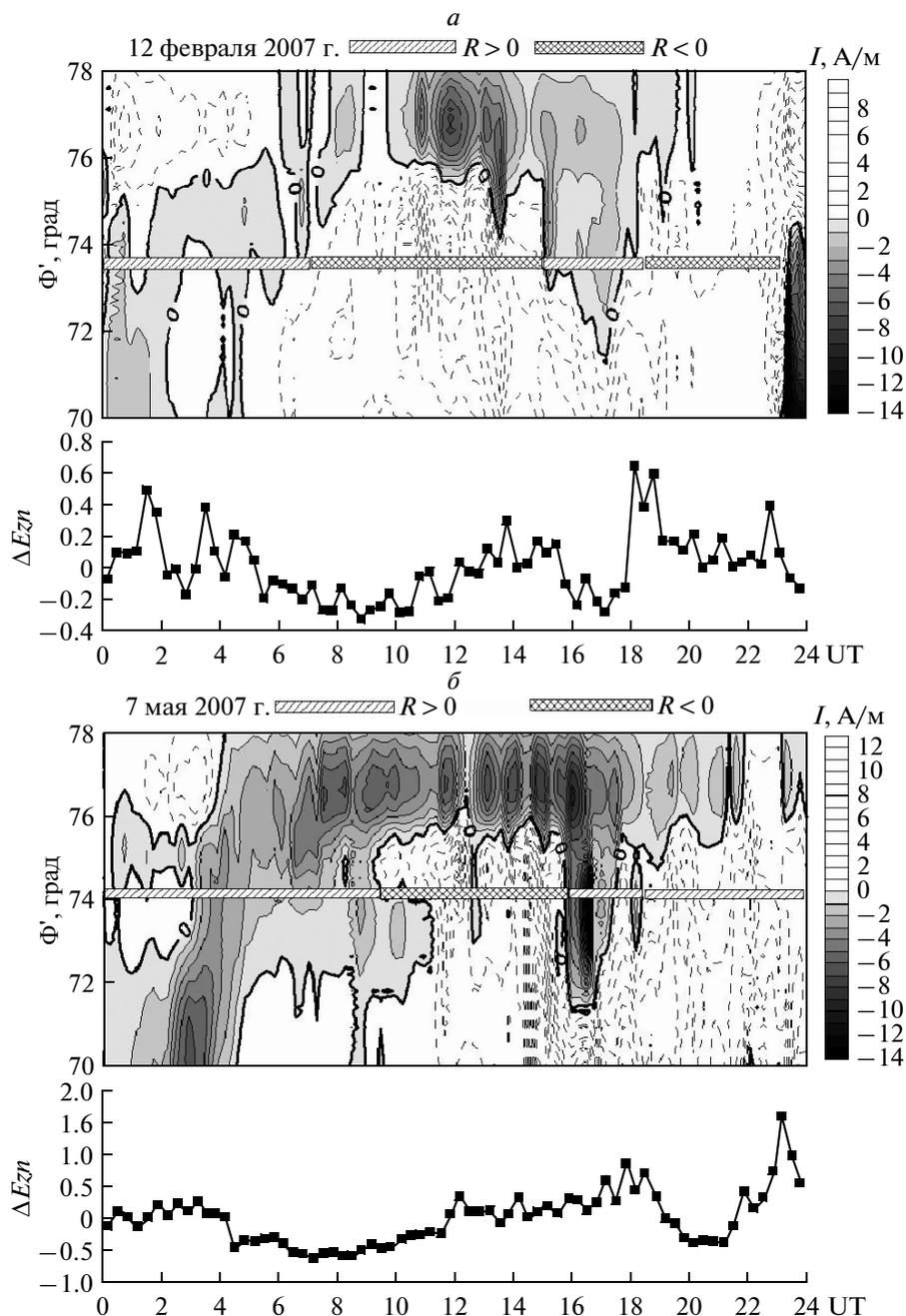


Рис. 4. Пространственное распределение плотности ионосферных токов на меридиане обс. Хорзунд и вариации $\Delta E_{zп}$: *a* – 12.02.2007 г., *б* – 07.05.2007 г., *в* – 25.05.2007 г.

до 130 нТл (рис. 2*в*), а в северном полушарии центр этой суббури (западный электроджет) располагался полярнее обс. Хорзунд (рис. 4*в*), но сама суббуря наблюдалась и на широте обс. Хорзунд. Известно, что область западного тока связана с вытекающим продольным током, уменьшающим потенциал ионосферы. Можно предположить, что наблюдающееся в это время уменьшение значений $\Delta E_{zп}$ в обеих точках, и соответственно, высокий коэффициент положительной корреляции,

обусловлен нахождением этих станций вблизи проекции вытекающего продольного тока.

В обс. Хорзунд значимой корреляции в течение целого дня для всех трех дней не наблюдалось, по-видимому, за счет наличия как положительной, так и отрицательной корреляции. Однако в работе [Odzimek et al., 2011] по данным 30 дней наблюдений E_z в Хорзунде и определении ионосферного потенциала “над головой” по дан-

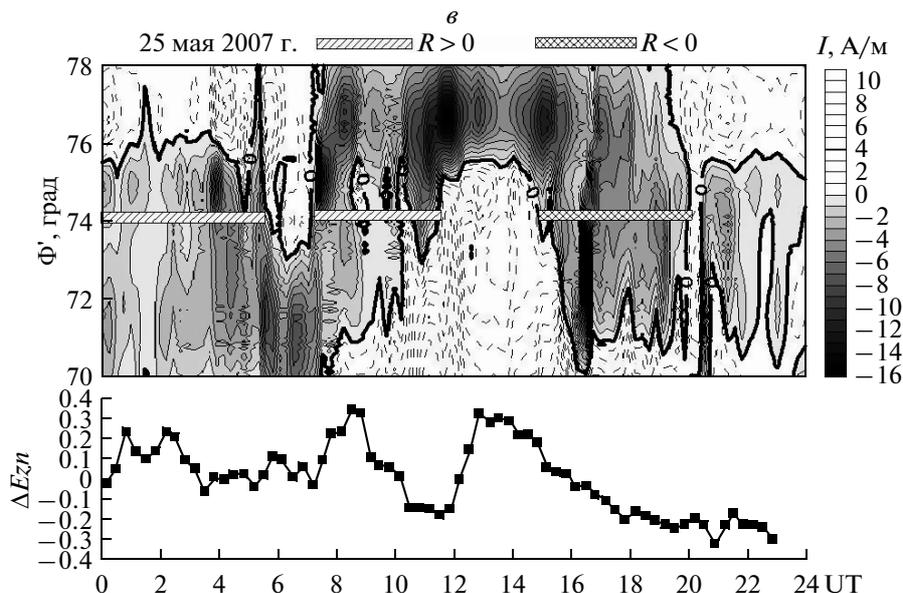


Рис. 4. Окончание.

ным одновременных наблюдений на радарх SuperDARN была найдена линейная зависимость между атмосферным электрическим полем и ионосферным потенциалом, но с маленьким коэффициентом корреляции ($R = 0.25$). На графике рис. 2 в этой работе показан большой разброс значений и также наличие как положительной, так и отрицательной корреляции.

Из таблицы видно, что 12 февраля 2007 г. положительная корреляция между вариациями приземного электрического поля и ионосферным потенциалом “над головой” наблюдалась в интервалы 00–07 UT и с 15:00–18:30 UT, когда на широте обс. Хорзунд отмечался западный ток (рис. 4а). В 00–07 UT обс. Хорзунд находилась в области очень слабых, преимущественно западных ионосферных токов (т.е. вблизи проекции вытекающих продольных токов), и распределение электрического потенциала в ионосфере, в этом случае, хорошо описывается моделью Веймера. В 15–18:30 UT обс. Хорзунд находилась в области достаточно однородного западного электроджета (рис. 4а) и вариации атмосферного электрического поля хорошо соответствовали вариациям ионосферного потенциала, полученного из модели. В периоды, когда над Хорзундом регистрировался восточный ток (что соответствует проекции втекающих продольных токов), коэффициент корреляции становился отрицательным (07–15 UT и 18:30–23 UT). Максимальные значения коэффициентов корреляции наблюдались в интервалы времени, когда согласно данным наблюдений ионосферной конвекции в северной полярной шапке на радарх SuperDARN (<http://www.jhuapl.edu/superdarn>) 12 февраля 2007 г. в 13–14 UT Хорзунд находился в области отрицательного вихря ионосферной конвекции (эти графики здесь не приводятся). Кроме того, на рис. 4а видно, в 10–14 UT полярнее обс. Хорзунд наблюдался интенсивный западный ток, т.е. располагалась область вытекающих продольных токов, влияние которых, вероятно, и привело к уменьшению значений ΔEzn в Хорзунде.

Аналогичная картина наблюдалась 7 мая (рис. 4б). Относительно высокие (0.85 и 0.61) положительные коэффициенты наблюдались, когда Хорзунд находился в области западного тока. Исключение составлял интервал 18:30–24 UT (~21–03 MLT).

В случае 25 мая до 15 UT повторялся сценарий первых двух дней — в области западных токов наблюдалась положительная корреляция вариаций приземного электрического поля и ионосферного потенциала “над головой”. Однако в 15–20 UT, когда Хорзунд находился в вечернем секторе в области интенсивных западных токов, коэффициент корреляции был большим, но отрицательным (–0.82). Согласно данным наблюдений на радарх SuperDARN 25 мая в 16:00–16:30 UT Хорзунд находится в области отрицательного вихря ионосферной конвекции (эти графики здесь не приводятся).

Из таблицы видно, что в 11:30–15:00 UT корреляция вариаций атмосферного электрического поля с ионосферным потенциалом отсутствовала как в обс. Хорзунд, так и на ст. Восток. В это время в ММП отмечались отрицательные значения

V_u и положительные значения V_z . Такая же ситуация наблюдалась и в 20:30–24:00 UT.

Высокий положительный коэффициент корреляции между $\Delta E_z n$ и U_{ext} , полученный для большинства интервалов на ст. Восток, свидетельствует о корректном использовании принятой модели для вычисления ионосферного потенциала. Отсутствие корреляции в отдельные интервалы времени (12 февраля и 25 мая) свидетельствует о неприменимости модельного представления ионосферного потенциала для данных условий. Возможно, что в магнитовозмущенные периоды интенсивные токи в E -области ионосферы существенно искажают потенциал, рассчитанный по модели. В работе [Котиков и Шишкина, 1997] показано, что продольные токи текут на границах восточного и западного электроджетов, кроме того, имеют место мелкомасштабные продольные токи, ответственные за изменения величин этих токов. Отсутствие связи вариаций $\Delta E_z n$ и U_{ext} в Хорзунде в периоды интенсивных магнитных возмущений может быть связано с мелкомасштабными продольными токами, которые не учитываются существующими моделями стационарной конвекции.

Высокий отрицательный коэффициент корреляции, по всей вероятности, может быть получен в результате того, что obs. Хорзунд попадает в область отрицательного вихря конвекции, а не положительного, как предсказывается по модели.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ 3-х дней одновременных наблюдений атмосферного электрического поля (E_z) в южной полярной шапке на антарктической ст. Восток и арктической obs. Хорзунд на архипелаге Шпицберген, расположенной вблизи полярной границы аврорального овала показал, что в полярной шапке (ст. Восток) вариации E_z контролируются вариациями потенциала ионосферы над точкой наблюдения с высоким коэффициентом корреляции ($R \sim 0.7-0.9$).

В obs. Хорзунд ситуация оказалась сложнее. В интервалы, когда Хорзунд находился в области западного электроджета корреляция вариаций E_z с значениями потенциала ионосферы “над головой”, полученными по модели Веймара [Weimar, 2005], обычно была положительной с коэффициентами корреляции $R \sim 0.60-0.85$. Если Хорзунд оказывался в области восточного электроджета, корреляция обычно становилась отрицательной с $R \sim 0.7-0.8$. В большинстве случаев в такие интервалы полярнее Хорзунда регистрировался западный электроджет, а по данным радаров SuperD-ARN obs. Хорзунд располагалась в области отрицательного вихря ионосферной конвекции.

Исследования в obs. Хорзунд выполнены в рамках Российско-Польского научного сотрудничества при частичной поддержке РФФИ грант № 10-05-00247. Наблюдения на ст. Восток проводятся силами Российской антарктической экспедиции, при частичной поддержке Австралийской антарктической службы ААС № 974.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бандилет О.И., Канониди Х.Д., Чернышова С.П., Шефтель В.М. Эффекты магнитосферных суббурь в атмосферном электрическом поле // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 1. С. 159–160. 1986.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С. Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 1. С. 51–60. 2010.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С. Вариации приземного электрического поля в высоких широтах и разности потенциалов поперек полярной шапки во время утренних суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 3. С. 397–404. 2011.
- Котиков А.Л., Гизлер В.А. Болотинская Б.Д. Определение разрешающей способности методики восстановления ионосферных токов по данным меридиональной цепочки магнитометров // Тр. ААНИИ. Т. 425. С. 26–34. 1991.
- Котиков А.Л., Шишкина Е.М. Расчет пространственного распределения продольных токов в полуденном секторе авроральной зоны во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 37. № 1. С. 57–65. 1997.
- Лукьянова Р.Ю., Круглов А.А., Франк-Каменецкий А.В., Котиков А.Л., Барнс Г.Б., Френч В.Д.Р. Соотношение между потенциалом ионосферы и приземным электрическим полем в южной полярной шапке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 3. С. 387–396. 2011.
- Морозов В.Н., Трошичев О.А. Моделирование вариаций полярного атмосферно-электрического поля, связанного с магнитосферными продольными токами // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. С. 759–769. 2008.
- Belova E., Kirkwood S., Nielsen E., Tamm H. The ground-level atmospheric current response to a magnetic substorm // Proc. Fifth Intern. Conf. on Substorms, St. Petersburg, Russia, 16–20 May 2000, P. 473–476. 2000.
- Belova E., Kirkwood S., Tamm H. The effect of magnetic substorms on near-ground atmospheric currents // Ann. Geophys. V. 18. P. 1623–1629. 2001.
- Burns G.B., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Reddell B.D. Interannual consistency of bimonthly differences in diurnal variations of ground-level vertical electric field // J. Geophys. Res. V. 110. № D10. P. 1–14. 2005.
- Corney R.C., Burns G.B., Michael K., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Papitashvili V.O., Duldig M. The influence of polar-cap convection on geoelectric

- feld at Vostok, Antarctica // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 65. № 2. P. 345–354. 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. P. 179–190. 2001.
 - *Hays P.B., Roble R.G.* A quasi-static model of global atmospheric electricity. 1. The lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 3291–3305. 1979.
 - *Kotikov A.L., Frank-Kamenetsky A.V., Latov Yu.O., Troshichev O.A., Shishkina E.M., Murphree J.S., Elphinstone R.D.* Filamentary structure of the westward electrojet in the midnight sector auroral distribution during substorms: comparison with Viking auroral observations // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 55. № 14. P. 1763–1774. 1993.
 - *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. 33rd Ann. Seminar “Physics of Auroral Phenomena” Ap- atity.* P. 171–174. 2010.
 - *Markson R.* The Global Circuit Intensity: Its Measurement and Variation over the Last 50 Years // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* P. 223–241. doi:10.1175/BAMS-88-2-223. 2007.
 - *Odzimek A., Kubicki M., Lester M., Grocott A.* Relation between SuperDARN Ionospheric potential and ground electric field at polar station Hornsund // *Proc. 14-th Inter. Conf. on Atmospheric Electricity.* 08–12 August 2011. Rio de Janeiro, Brazil. 2011.
 - *Park C.G.* Downward mapping of high-latitude ionospheric electric field to the ground // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 168–174. 1976.
 - *Tinsley B.A., Liu W., Rohrbaugh R.P.* South Pole electric field responses to overhead ionospheric convection // *J. Geophys. Res.* V. 103 (D20). P. 26, 137–26, 146. 1998.
 - *Weimer D.R.* Models of high-latitude electric potentials derived with a least error fit of spherical harmonic coefficients // *J. Geophys. Res.* V. 100 (A10). P. 19, 595–19, 607. 1995.
 - *Weimer D.R.* Improved ionospheric electrodynamics models and application to calculating Joule heating rates // *J. Geophys. Res.* V. 110, A05306, doi:10.1029/2004JA010884. 2005.