

УДК 550.386

ВЛИЯНИЕ СУББУРЬ В НОЧНОМ СЕКТОРЕ ЗЕМЛИ НА ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛЯРНЫХ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

© 2012 г. Н. Г. Клейменова¹, О. В. Козырева¹, М. Кубицки², А. Оджимек², Л. М. Малышева¹

¹ ФГБУ науки Институт физики Земли РАН, г. Москва

² Институт геофизики Польской Академии Наук, г. Варшава

e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 15.11.2011 г.

Выполнен анализ среднесуточных вариаций атмосферного электрического поля ΔE_z в обс. Хорзунд, расположенной вблизи границы полярной шапки, и в обс. Какиока, расположенной в приэкваториальных широтах в магнитоспокойных и слабо возмущенных условиях. Установлено, что в обеих обсерваториях среднесуточные вариации ΔE_z в основном контролируются расположением точки наблюдения относительно фокусов конвективных вихрей системы DP_0 . Показано, что развитие суббури в ночном секторе магнитосферы (резкий всплеск AE индекса) приводит к отрицательным вариациям ΔE_z в дневном секторе полярных широт (обс. Хорзунд) и положительным отклонениям ΔE_z в предполуночное время в приэкваториальных широтах (обс. Какиока). Сделан вывод, что вариации ΔE_z в обс. Какиока в значительной мере контролируются экваториальным электроджетом, максимальным в дневные часы, а в обс. Хорзунд — авроральным электроджетом, максимальным в ночные и ранние утренние часы местного времени.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основным источником глобальной атмосферной электрической цепи и вариаций приземного атмосферного электрического поля является грозная активность, мировые центры которой находятся в центральной части Африки, Азии и Америки. Глобально интегрированный эффект этих гроз проявляется одновременно на всей Земле в изменении напряженности электрического поля атмосферы. Это — унитарная (УТ вариация) [Israel, 1973], которую обычно называют “кривой Карнеги” по имени парусника Carnegie, на котором эта вариация была впервые обнаружена. В условиях так называемой “хорошей погоды” (отсутствие сильного ветра, осадков, тумана и т.д.) унитарная вариация проявляется на всех широтах и долготах, в основном, в виде минимальных значений напряженности приземного электрического поля в ~02–04 UT и максимальных в ~18–20 UT.

Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через высокоширотную ионосферу, следовательно, на состояние и вариации атмосферного электрического поля большое влияние могут оказывать магнитосферные и ионосферные возмущения. Наиболее четко это проявляется в полярных и авроральных широтах, что подтверждается многочисленными публикациями, (например, [Olsen, 1971; Апсен и др., 1988; Michnowski et al., 1991; Belova et al., 2001; Frank-Kamenetsky et al., 2001; Никифорова и др., 2003;

Клейменова и др., 1998, 2010]). В то же время эффекты геомагнитных возмущений в вариациях E_z были обнаружены во время магнитных бурь и на средних широтах. Так, анализ данных наблюдений E_z в среднеширотной обс. Свидер показал [Клейменова и др., 2008], что в средних широтах в магнитовозмущенное время могут наблюдаться большие дневные возмущения в E_z , происходящие одновременно с развитием геомагнитных суббурь в ночном секторе авроральных широт.

В дневные часы в магнитоспокойное время в полярных широтах обычно геомагнитных возмущений не отмечается. В то же время предварительный анализ данных наблюдений вертикальной компоненты приземного электрического поля (E_z) в полярной обс. Хорзунд показал, что и в таких условиях в дневные часы возможно появление значительных вариаций в E_z .

Цель настоящей работы — выявление возможного влияния ночных магнитосферных суббурь на дневные вариации в E_z в полярных районах, подобно тому, как это было ранее нами установлено в среднеширотной обс. Свидер [Клейменова и др., 2008]. Кроме того, было бы интересным посмотреть, влияют ли суббури на вариации атмосферного электрического поля и в экваториальных широтах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данная работа основана на анализе данных наблюдений вариаций Ez в двух обсерваториях, расположенных на разных широтах и долготах: в полярной обс. Хорзунд на арх. Шпицберген (HOR, $\Phi' = 74.0^\circ$, $\Lambda' = 110.5^\circ$, геомагнитный полдень в ~ 09 UT) и в приэкваториальной обс. Какиока (КАК, $\Phi' = 28.8^\circ$, $\Lambda' = 210.7^\circ$, геомагнитный полдень в ~ 03 UT). Поскольку обычно интервалы “хорошей погоды” в этих обсерваториях не совпадают, анализа одновременных наблюдений не проводилось. Ниже приведены результаты, полученные отдельно в полярных (обс. Хорзунд) и экваториальных (обс. Какиока) обсерваториях.

2.1. Полярные широты, обс. Хорзунд. В работе использовались данные наблюдений вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (Ez) в полярной обс. Хорзунд, полученные в условиях “хорошей погоды”, сохраняющихся в течение всего дня (24 часа). Анализировались данные Ez при спокойных или слабо возмущенных условиях ($Kp < 2$) в период минимума солнечной активности (2006–2009 гг.). Исходные 1-мин измерения Ez были сглажены 30-мин скользящим окном и нормированы на среднее значение Ez в данный день. Для построения средних суточных вариаций было проведено осреднение данных 20 дней наблюдений, из которых была исключена среднесуточная унитарная, т.е. глобальная вариация (кривая Карнеги Ez_{CAR}), нормированная на ее среднее значение [Israel, 1973]. Список анализируемых случаев был взят из работы [Odzimek et al., 2011]. Полученный результат показан на рис. 1.

Положительные отклонения ΔEz (рис. 1) в утренние часы (01–04 UT, т.е. 04–07 MLT), по-видимому, являются результатом влияния утренних суббурь, развивающихся в данном секторе магнитосферы, и расположением Хорзунда в области положительного вихря полярной ионосферной конвекции. Отрицательные отклонения ΔEz в ночные часы (18–23 UT, т.е. 21–02 MLT), вероятно, вызваны ночными суббурями и положением обсерватории в области отрицательного вихря ионосферной конвекции, как это было показано ранее в работе [Клейменова и др., 2010].

Четко видно, что кроме этих экстремумов на кривой суточного хода ΔEz (рис. 1) отмечаются также отрицательные отклонения ΔEz в интервале ~ 11 –16 UT (14–19 MLT). Сопоставление этих вариаций ΔEz в Хорзунде с одновременными значениями AE индекса авроральной активности показало, что, в подавляющем большинстве рассмотренных случаев, несмотря на относительно магнитоспокойные условия ($Kp = 0$ –1), отрицательные отклонения ΔEz в 11–16 UT сопровождалась возрастанием AE до 200–300 нТл, а иногда и более. В полярных широтах ночного сектора маг-

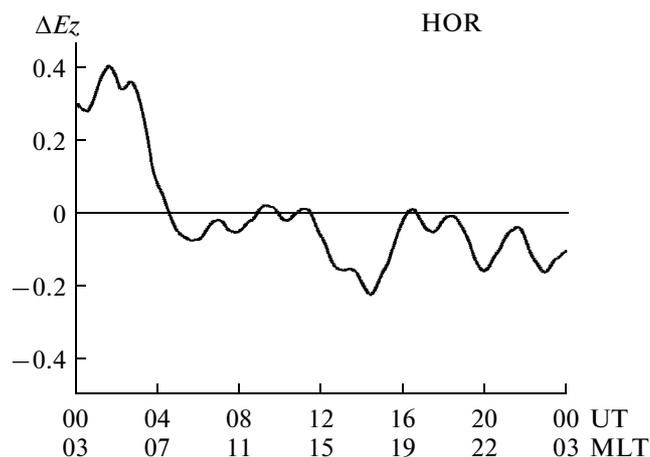


Рис. 1. Среднесуточные вариации $\Delta Ez = Ez - Ez_{CAR}$ в магнитоспокойных и слабо возмущенных условиях ($Kp \sim 0$ –1) в обс. Хорзунд.

нитосферы (обс. BRW, $\Phi' = 70^\circ$, $\Lambda' = 250^\circ$) в это время наблюдались суббури, которые часто отсутствовали в авроральных широтах, в обс. Колледж (СМО, $\Phi' = 65^\circ$, $\Lambda' = 263^\circ$), что типично для слабо возмущенных условий.

Пример такого события приведен на рис. 2а. Амплитуда ночной полярной суббури составляла порядка 200 нТл, суббуря наблюдалась только в полярной обс. BRW и не отмечалась в авроральных широтах (обс. СМО). В обс. Хорзунд в это время был зарегистрирован восточный электроджет. На рис. 2а также показана карта глобальной ионосферной конвекции в обсуждаемый интервал времени, полученная по данным радаров SuperDARN (<http://superdarn.jhuapl.edu/>). Видно, что обс. Хорзунд располагается в области отрицательного вихря конвекции.

На рис. 2б показан еще один пример появления дневных отрицательных вариаций ΔEz в обс. Хорзунд во время развития суббури в ночном секторе Земли. Несмотря на то, что в это время общая планетарная геомагнитная активность была невысокой ($Kp \sim 2$), в ночном секторе магнитосферы наблюдалась интенсивная суббуря с амплитудой ~ 1000 нТл в обс. BRW и ~ 300 нТл в обс. СМО. Видно, что и в этом случае обс. Хорзунд располагалась в области отрицательного вихря конвекции. Следует заметить, что реакция дневных вариаций ΔEz на развитие ночной суббури носит явно нелинейный характер. Так, большая (~ 1000 нТл) суббуря, приведенная на рис. 2б, сопровождалась примерно такими же дневными отклонениями в ΔEz , как и значительно более слабая суббуря (рис. 2а).

Таким образом, результаты анализа показали, что наблюдаемые в магнитоспокойное время посполуденные отрицательные отклонения ΔEz в обс. Хорзунд, могут быть результатом развития по-

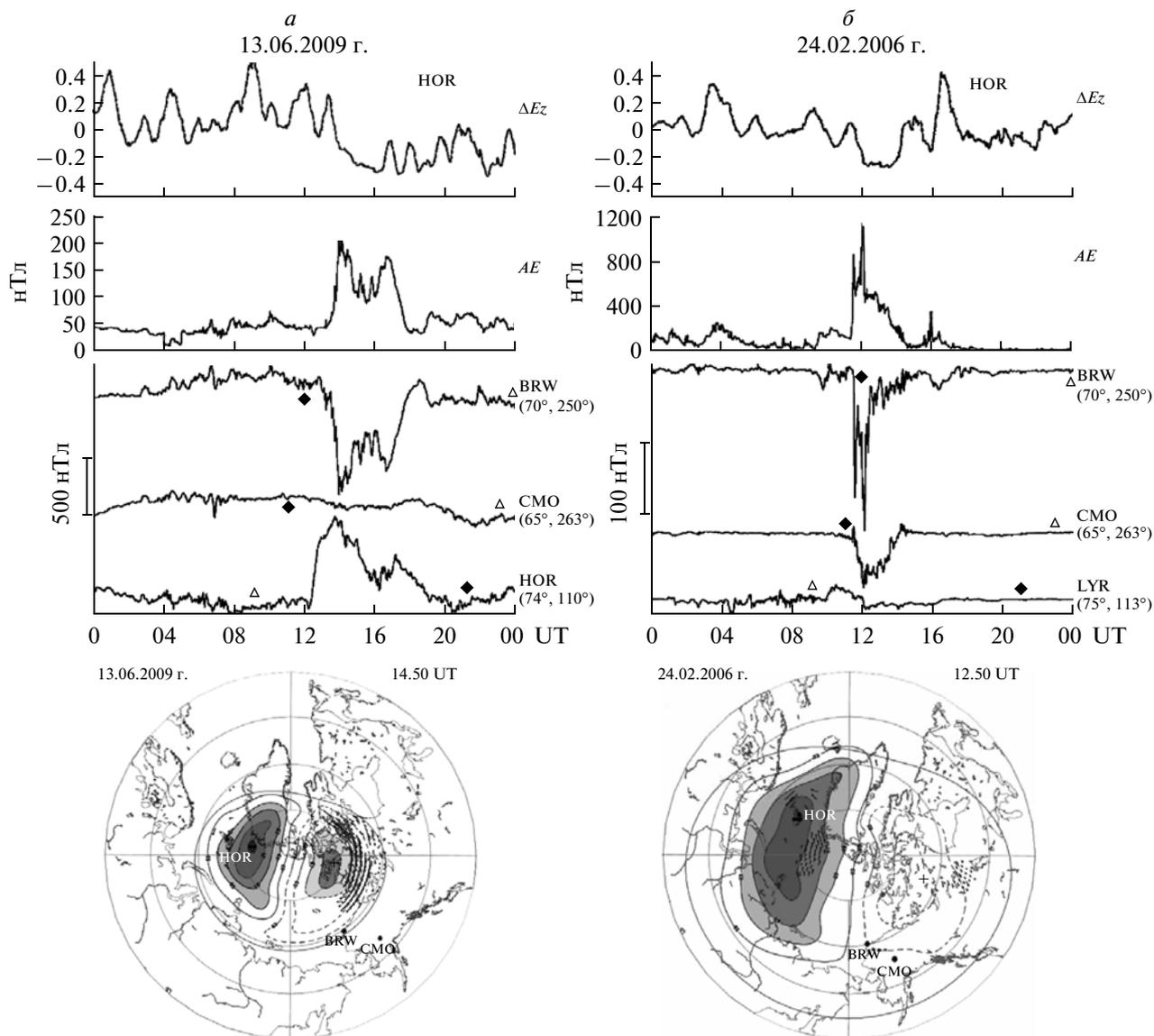


Рис. 2. Примеры вариаций ΔE_z в обс. Хорзунд, AE -индекса и геомагнитных возмущений в ночном (обс. BRW и CMO) и дневном (обс. HOR или LYR) секторах Земли, геомагнитные координаты обсерваторий показаны справа, зачерненный ромб – местная магнитная полнота, светлый треугольник – полдень; *a* – 13 июня 2009 г., *b* – 24 февраля 2006 г.

лярной суббури в антиподной (ночной) стороне магнитосферы. Поскольку вариации приземного электрического поля являются отражением состояния глобальной электрической цепи, можно предположить, что выявленная связь ΔE_z с суббури на ночной стороне является результатом влияния изменений проводимости ночной ионосферы, вызванных высыпанием энергичных электронов во время развития суббури, на общее состояние глобальной электрической цепи. Однако знак вариаций ΔE_z в полярных широтах будет определяться направлением ионосферной конвекции над точкой наблюдения ΔE_z .

2.2. Экваториальные широты, обс. Какиока. Подобный анализ был выполнен и для данных

наблюдений вариаций атмосферного электрического поля (E_z) в обс. Какиока (КАК, $\Phi' = 28.8^\circ$, $\Lambda' = 210.7^\circ$, геомагнитный полдень в ~ 03 UT) за 2009 г. Эти данные были взяты с CD-ROM, содержащего ежегодный отчет обс. Какиока за 2009 г. Как и в Хорзунде, исходные 1-мин измерения E_z в обс. Какиока были сглажены 30-мин скользящим окном, нормированы на среднее значение E_z в данный день, и исключена среднесуточная унитарная вариация (кривая Карнеги E_{zCAR}). Условиями “хорошей погоды” считались дни, в течение 24 часов которых не было отрицательных значений E_z и больших импульсных выбросов E_z длительностью более 30 мин.

Средние суточные вариации ΔE_z в обс. Какиока были построены отдельно для 26 магнитовозмущенных дней ($Kp > 2$ и $AE > 600$ нТл) и 179 магнитоспокойных и слабо возмущенных дней ($Kp < 2$ и $AE < 600$ нТл) в 2009 г. полученные результаты приведены на рис. 3. Видно, что, как и в полярных широтах (обс. Хорзунд, рис. 1), в обс. Какиока наблюдаются систематические суточные вариации значений ΔE_z , вызванные, по-видимому, магнитосферными и ионосферными источниками.

На рисунке 3 видно, что среднесуточные вариации ΔE_z в приэкваториальных широтах в спокойных (рис. 3а) и магнитовозмущенных условиях (рис. 3б) подобны и имеют четко выраженные минимумы в послеполуденные (~12–17 MLT) и послеполуночные часы (~23–06 MLT), разделенные положительными отклонениями в утренние (максимум в ~8 MLT) и вечерние часы (максимум в ~20 MLT). В магнитовозмущенных условиях послеполуденный минимум сдвигается ближе к полдню и увеличивается по амплитуде, а послеполуночный минимум перемещается к более поздним часам. Предполуночный максимум положительных значений ΔE_z в магнитовозмущенное время также увеличивается по амплитуде. Если в спокойных условиях положительные отклонения ΔE_z наблюдаются в интервале ~18–22 MLT, то в возмущенных условиях этот интервал расширяется до ~17–24 MLT.

Анализ данных наблюдения показал, что резкий подъем значений ΔE_z в вечернее время часто отмечается после резкого возрастания значений AE индекса (т.е. появление суббури в ночном секторе магнитосферы) как в спокойных, так и в возмущенных условиях. На рисунке 4 показаны примеры таких событий, показывающие, что всплеск значений AE индекса, свидетельствующий о резком увеличении проводимости в ночной высокоширотной ионосфере за счет высыпающихся суббуревых электронов, приводит к возрастанию ΔE_z в приэкваториальных широтах, значительно превышающему среднесуточные значения (рис. 3). При анализе выбирались те обсерватории, которые в обсуждаемые интервалы времени находились вблизи местной геомагнитной полночи, которая на рис. 4 показана темным ромбом.

На рисунке 4 также приведены магнитограммы обс. Какиока. Видно, что отрицательные значения ΔE_z в дневное время наблюдаются одновременно с интенсификацией экваториального электроджета, наиболее четко проявляющейся в U компоненте геомагнитного поля.

Заметим, что даже в условиях “хорошей погоды” в вариации атмосферного электрического поля могут вносить вклад не только магнитосферные или ионосферные источники, но и локальные метеорологические процессы в приземном обменном слое, связанные с изменениями вели-

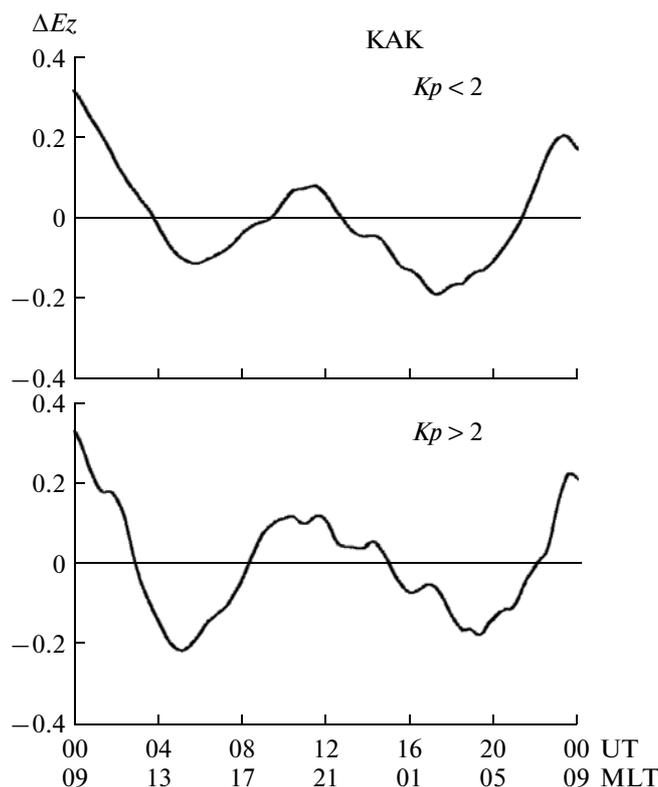


Рис. 3. Среднесуточные вариации $\Delta E_z = E_z - E_{zCAR}$ в магнитоспокойных, $Kp < 2$ (а) и возмущенных, $Kp > 2$ (б) условиях в обс. Какиока.

чины и распределения по высоте объемных электрических зарядов [Апсен и др., 1988].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работах [Michnowski et al., 1991; Никифорова и др., 2003; Клейменова и др., 1998, 2010] было показано, что из-за особого расположения обс. Хорзунд вблизи экваториальной границы полярной шапки на вариации приземного электрического поля в этой точке в утреннее и ночное время большое влияние могут оказывать магнитосферные суббури, развивающиеся на более низких — авральных широтах на данном меридиане. Знак вариаций E_z при этом определяется направлением вихря полярной ионосферной конвекции над Хорзундом [Клейменова и др., 2010].

В данной работе мы показали, что в магнитоспокойных и слабо возмущенных условиях в дневные часы, когда, как правило, геомагнитные возмущения на данном меридиане отсутствуют, в вариациях “остаточного” (ΔE_z) приземного электрического поля могут наблюдаться отрицательные отклонения. Такие вариации в E_z обычно сопровождались резким возрастанием значений AE индекса, обусловленного развитием суббури в

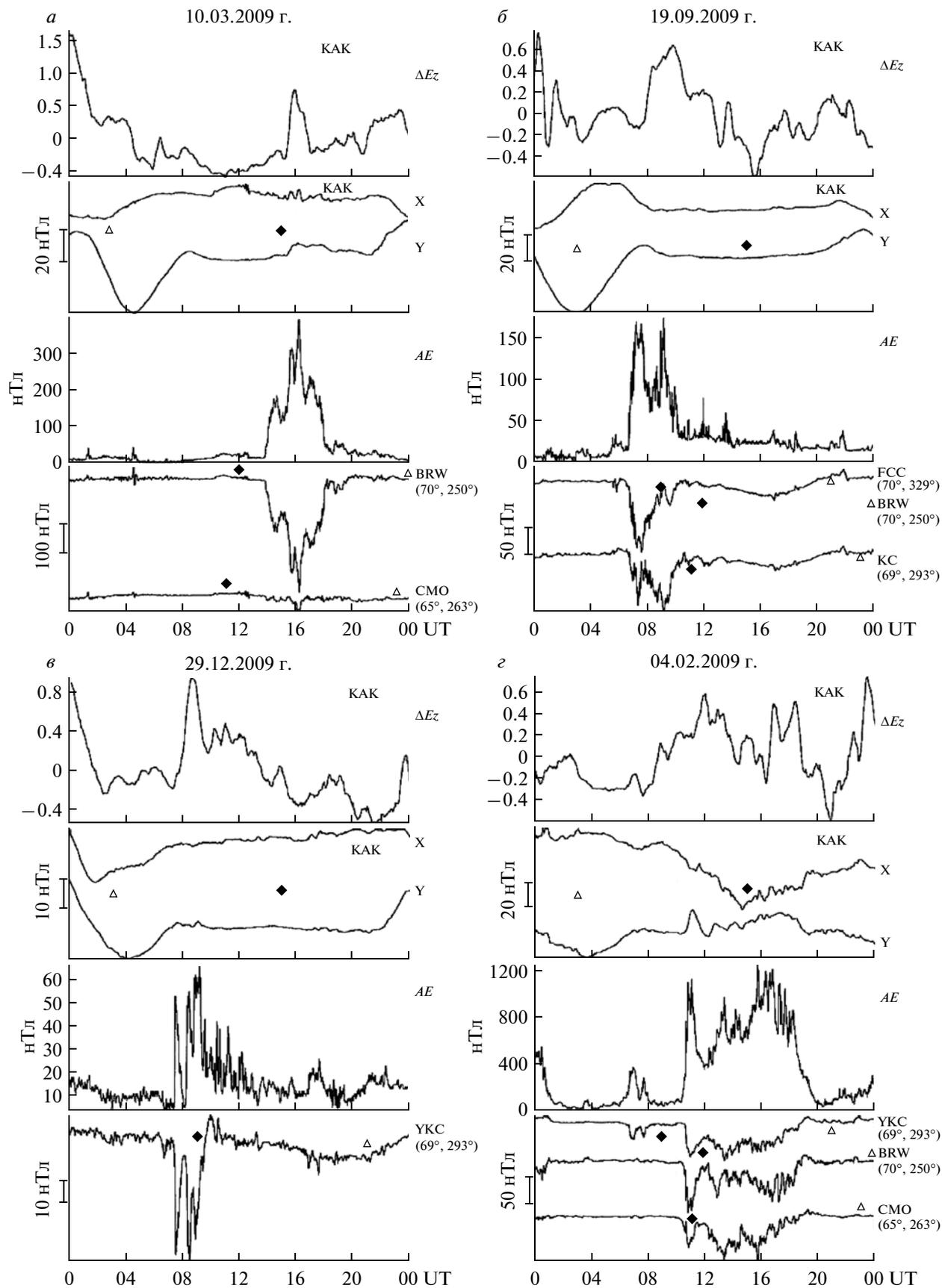


Рис. 4. Примеры вариаций ΔE_z и магнитограммы в obs. Какиока, а также одновременные вариации AE -индекса, магнитограммы обсерваторий в ночном секторе Земли; геомагнитные координаты обсерваторий показаны справа, зачерненный ромб — местная магнитная полночь, светлый треугольник — полдень.

ночной стороне магнитосферы на полярных широтах (obs. BRW).

Поскольку вариации приземного электрического поля контролируются состоянием глобальной атмосферной электрической цепи, замыкающейся через высокоширотную ионосферу, можно предположить, что в магнитоспокойных условиях на состояние этой цепи может оказывать влияние изменение проводимости ионосферы, вызванное суббурями в ночном секторе. В магнитоспокойных и слабо возмущенных условиях такие суббури развиваются, как правило, не в авроральной зоне, а на более высоких широтах, что мы и наблюдали в анализируемых случаях.

На графиках видно, что вариации в E_z несколько запаздывают относительно начала суббури. Это может быть связано с тем, что, как показано в работе [Ruscroft et al., 2000], фундаментальным свойством глобальной атмосферной электрической цепи является наличие электрической релаксации, т.е. времени, требуемого для изменения поля в e раз после внезапного включения или выключения источника (в предположении постоянства проводимости воздуха). В среднем время электрической релаксации у земной поверхности составляет около 40 мин.

Полученные нами результаты показали, что в приэкваториальных широтах (obs. Какиока) среднесуточные вариации ΔE_z во многом контролируются ионосферным электрическим током над обсерваторией (экваториальным электроджетом), максимум интенсивности которого наблюдается в дневные часы.

Заметим, что минимумы на кривой среднесуточных вариаций ΔE_z в obs. Какиока (~03–04 MLT и ~14–15 MLT) отмечаются в то время, когда эта обсерватория в результате суточного вращения Земли попадает на меридиан положения фокусов высокоширотной токовой системы DP_0 (рис. 5). В ряде работ (например, [Трошичев и Цыганенко, 1978]), показано, что токовая система DP_0 представляет собой остаточные суточные вариации геомагнитного поля, оставшиеся после исключения вариаций, связанных с ММП. Еще в ранних работах [Nagata and Kokobun, 1962; Nishida, 1971] было установлено, что эта глобальная токовая система состоит из двух вихрей, простирающихся до экватора, с центрами, расположенными в ~03–05 MLT и ~15–17 MLT на геомагнитных широтах выше 70° .

В работе [Мишин и др., 1978] был сделан вывод, что это остаточная токовая система DP_0 вызывается квазивязким взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой Земли и представляет

собой фон, на котором развиваются все остальные типы геомагнитных возмущений. Система DP_0 существует постоянно, не зависимо от знака ММП. Можно предположить, что электрическое поле этой системы, проникающее к экваториальным широтам, является источником среднесуточных вариаций остаточного приземного электрического поля ΔE_z в obs. Какиока (рис. 3).

На среднесуточные вариации ΔE_z в obs. Какиока большое локальное влияние, по-видимому, оказывает также резкое возрастание интенсивности экваториального электроджета в дневные часы. В магнитовозмущенное время экваториальный ток усиливается, что проявляется и в увеличении амплитуды послеполуденного экстремума в суточных вариациях ΔE_z (рис. 3б).

Форма среднесуточных вариаций ΔE_z в Какиока (рис. 3) и в Хорзунде (рис. 1), построенных по мировому времени (UT) не совпадает. Заметим, что вариации ΔE_z в obs. Какиока в значительной мере контролируются экваториальным электроджетом, максимальным в дневные часы, а в obs. Хорзунд — авроральным электроджетом, максимальным в ночные и ранние утренние часы местного времени. Однако в обеих обсерваториях в среднесуточных вариациях ΔE_z отмечаются экстремумы, соответствующие положению обсерватории вблизи меридианов нахождения фокусов конвек-

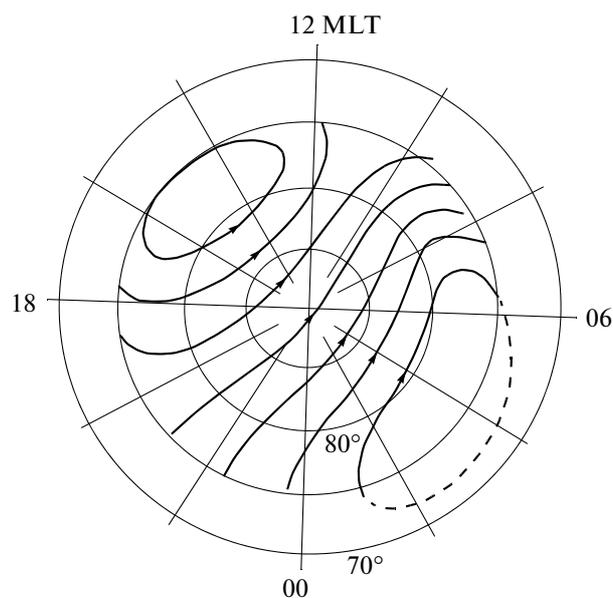


Рис. 5. Схема положения остаточной токовой системы DP_0 [Трошичев и Цыганенко, 1978].

тивных вихрей системы DP_0 , т.е. в $\sim 03-05$ MLT и $\sim 15-17$ MLT.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ среднесуточных вариаций атмосферного электрического поля $\Delta E_z = E_z - E_{zCAR}$ в obs. Хорзунд, расположенной вблизи границы полярной шапки, и в obs. Какиока, расположенной в приэкваториальных широтах, показал, что в магнитоспокойных и слабо возмущенных условиях среднесуточные вариации ΔE_z в основном контролируются расположением точки наблюдения относительно фокусов конвективных вихрей системы DP_0 .

2. Развитие суббури в ночном секторе магнитосферы (резкий всплеск AE индекса) приводит к отрицательным вариациям ΔE_z в дневном секторе полярных широт (obs. Хорзунд) и положительным отклонениям ΔE_z в предполуночное время в приэкваториальных широтах (obs. Какиока).

3. Кроме того, вариации ΔE_z в obs. Какиока в значительной мере контролируются экваториальным электроджетом, максимальным в дневные часы, а в obs. Хорзунд – авроральным электроджетом, максимальным в ночные и ранние утренние часы местного времени.

Исследования в obs. Хорзунд выполнены в рамках Российско-Польского научного сотрудничества при частичной поддержке РФФИ гранта № 10-05-00247.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ансен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышова С.П., Четаев Д.Н., Шефтель В.М. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука, 150 с. 1988.
- Клейменова Н.Г., Михновски С., Никифорова Н.Н., Козырева О.В. Вариации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля в вечернем секторе полярных широт (obs. Хорзунд) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 6. С. 149–156. 1998.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитной бури в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 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 аэрономия. Т. 50. № 1. С. 51–60. 2010.
- Мишин В.М., Базаржапов А.Д., Анистратенко А.А., Аксенова Л.В. Электрическое поле и магнитосферная конвекция, создаваемые незамагниченным солнечным ветром // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 18. №. 4. С. 751–753. 1978.
- Никифорова Н.Н., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С. Влияние авроральных высыпаний энергичных электронов на вариации атмосферного электрического поля в полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 1. С. 32–39. 2003.
- Трошичев О.А., Цыганенко Н.А. Корреляционные соотношения между параметрами межпланетного магнитного поля и геомагнитными вариациями в полярных районах // Геомагнитные исследования. № 25. С. 47–59. 1978.
- Belova E., Kirkwood S., Tammet H. The effect of magnetic substorms on near-ground atmospheric currents // Ann. Geophysical. V. 18. P. 1623–1629. 2001.
- 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.
- Israel H. Atmospheric Electricity. Publ. National Science Foundation by the Israel Program for Sci. Transl. ISBN 0 7065. 1973.
- Kubicki M. Results of atmospheric electricity and meteorological observations S.Kalinowski geophysical observatory at Świder // Pubs. Inst. Geophysics Polish Acad. Sci. D-56. (333). P. 3–7. 2001
- Michnowski S., Szymanski A., Nikiforova N.N., Kozyreva O.V., Ermolenko D.Y., Zielkowski K. On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric-electric field changes in Arctic station Hornsund, Spitsbergen // Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. D 35 (238). P. 83–96. 1991.
- Nagata T., Kokobun S. An additional geomagnetic daily variation field in the polar region on magnetically quiet days // Rep. Ionosph. Space REs. Japan. V. 16. P. 256–274. 1962.
- Nishida A. DP2 and polar substorm // Planet. Space Sci. V. 19. P. 205–221. 1971.
- Olson D.E. The evidence for auroral effects on atmospheric electricity // Pure Appl. Geophys. V. 84. P. 118–138. 1971.
- 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. Atmos. Electricity. 08–12 Aug. 2011. Rio de Janeiro, Brazil. 2011.
- Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. Terr. Phys. V. 62. P. 1563–1576. 2000.