

УДК 523.745;550.386

ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ И РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ ПОПЕРЕК ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ ВО ВРЕМЯ УТРЕННИХ ПОЛЯРНЫХ СУББУРЬ

© 2011 г. Н. Г. Клейменова¹, О. В. Козырева¹, М. Кубицки², С. Михновски²¹Учреждение РАН Институт физики Земли, Москва²Институт геофизики Польской Академии Наук, Варшава

e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 12.11.2010 г.

Выполнены исследования временных вариаций приземного атмосферного электрического поля (Ez) на геомагнитной широте 74° (обс. Хорзунд) во время полярных суббурь. Проведено сопоставление вариаций Ez с вариациями разности потенциалов поперек полярной шапки (Up) по данным наблюдений на радарх SuperDARN. Установлено, что в утреннем секторе временные вариации Ez в значительной мере контролируются временными вариациями электроджета и практически не зависят от временных вариаций Up . Можно предположить, что это является результатом проникновения электрического поля электроджета на тропосферные высоты.

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени надежно установлено влияние магнитосферных суббурь на вариации атмосферного электрического поля (Ez) в авроральных и полярных широтах [Olson, 1971; Бандилет и др., 1985, 1986; Апсен и др., 1988; Michnowski et al., 1991; Belova et al., 2001; Никифорова и др., 2003; Kleimenova et al., 2006; Kozyreva et al., 2007; Клейменова и др., 2010]. Особенно четко эти эффекты наблюдались в авроральной зоне, где развитие магнитосферных суббурь сопровождалось таким же бухтообразным уменьшением Ez (отрицательные градиенты). В более высоких широтах в подготовительную фазу суббури отмечалось возрастание Ez (положительные градиенты) [Бандилет и др., 1985], которое с началом фазы развития суббури иногда сменялось уменьшением Ez , т.е. отрицательными градиентами [Michnowski et al., 1991]. В работе [Клейменова и др. 2010] показано, что в обс. Хорзунд на геомагнитной широте 74° в вариациях Ez , связанных с суббуриями, в утреннем секторе наблюдались положительные градиенты Ez , а в вечернем — отрицательные (уменьшение амплитуды Ez).

В то же время многими авторами отмечалось, что на вариации атмосферного электрического поля в полярных широтах значительное влияние оказывают электрические поля ионосферной конвекции, т.е. изменения разности потенциалов поперек полярной шапки, [Angelo et al., 1982; Жданов и др., 1984; Апсен и др., 1988; Tinsley et al., 1998; Corney et al., 2003; Круглов и Франк-Каменецкий, 2010]. Кроме того, высокоширотные вариации Ez контролируются также Bz - и Vu -компонентами межпланетного магнитного поля (ММП) [Michnowski,

1998; Frank-Kamenetsky et al., 2001], и продольными электрическими токами [Michnowski, 1998; Морозов и Трошичев, 2008].

Целью данной работы является исследование возможных эффектов влияния разности потенциалов поперек полярной шапки во время магнитосферных суббурь на приземное электрическое поле атмосферы в обс. Хорзунд (НОР , $\Phi' = 74.0^\circ$, $\Lambda' = 110.5^\circ$) на архипелаге Шпицберген. Эта обсерватория в зависимости от уровня геомагнитной активности и местного времени может проектироваться в различные магнитосферные домены. Во время сильных магнитных возмущений полярная шапка расширяется, и обс. Хорзунд оказывается в области разомкнутых силовых линий. В магнитоспокойных условиях, когда размер полярной шапки уменьшается, обс. Хорзунд может проектироваться в область экваториальной границы полярной шапки или в авроральную зону, т.е. в область замкнутых силовых линий.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использованы данные наблюдений вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (Ez) в польской обс. Хорзунд, полученные в условиях так называемой “хорошей погоды”, т.е. в отсутствии сильного ветра, осадков и др. Наблюдения Ez выполнялись с помощью электростатического флюксметра [Kubicki, 2001]. Наиболее детально были проанализированы 12 случаев утренних суббурь в 2004–2006 гг., ранее обсуждаемые в работе [Клейменова и др., 2010] и 10 ночных суббурь. Рассмотрим эти данные подробнее. При анализе зарегистрированные в обс. Хорзунд

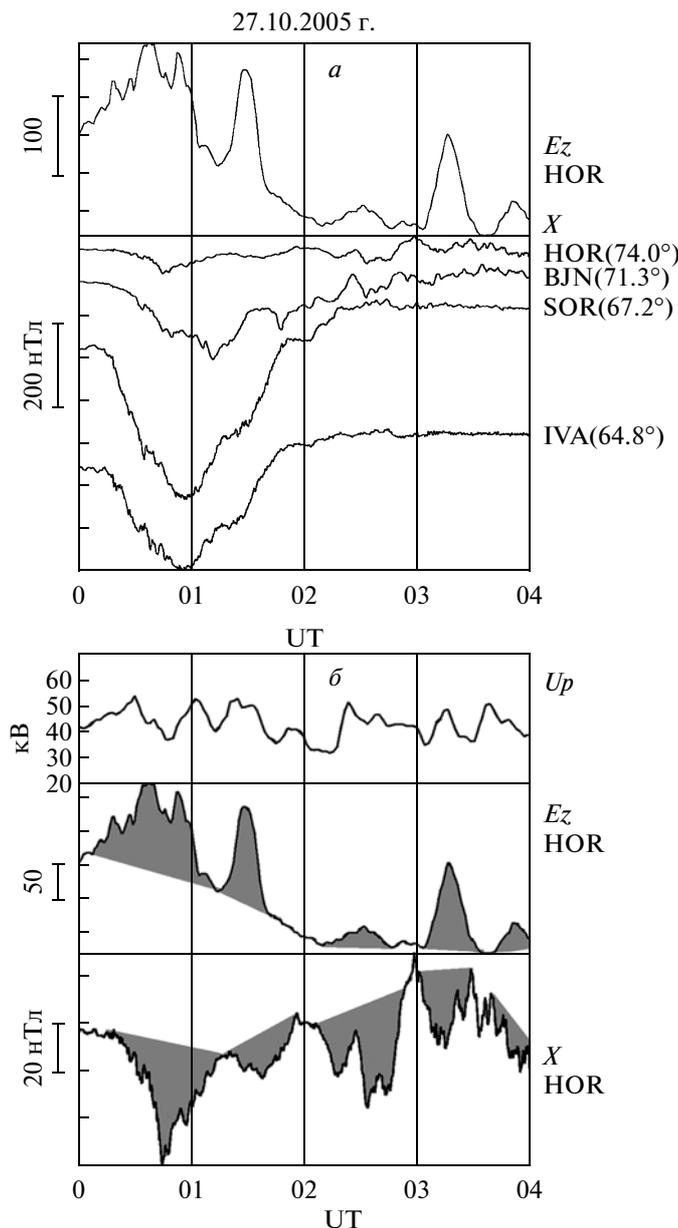


Рис. 1. Вариации E_z в относительных единицах в обс. Хорзунд и магнитограммы некоторых скандинавских обсерваторий (а), справа показаны их международные коды и геомагнитная широта; вариации разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p), E_z и X -компоненты магнитного поля в обс. Хорзунд 27 октября 2005 г. (б).

1-минутные значения E_z осреднялись с использованием 10 мин скользящего окна для устранения мелкомасштабных флюктуаций с периодами меньше 10 мин. Кривая Карнеги из наблюдаемых значений E_z не вычиталась.

Наиболее четкие результаты были получены для утреннего сектора, в котором развитие суббури обычно сопровождалось положительными отклонениями E_z [Клейменова и др., 2010]. В качестве

примера рассмотрим случай утренней суббури 27 октября 2005 г. (рис. 1) в умеренно возмущенных условиях с $Kp = 3$. Видно (рис. 1а), что в 00–02 UT на геомагнитных широтах ниже 70° (обс. SOR, IVA) наблюдалась интенсивная суббури с наибольшей амплитудой (~ 300 нТл) в обс. SOR ($\Phi = 67.2^\circ$), где, судя по поведению Z -компоненты поля (эти данные на рисунке не приводятся), располагался центр авроральной электроструи. В обс. HOR в это время отмечались лишь незначительные геомагнитные возмущения (рис. 1а). Положительные отклонения в E_z в HOR в общих чертах были зеркально подобны временному ходу магнитной бухты в авроральных широтах.

На рис. 1б для данного интервала времени приведены вариации разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p). Значения U_p были взяты с сайта [http://superdarn.jhuapl.edu], где представлены глобальные картины конвекции с 2-минутным временным разрешением, полученные по наблюдениям на системе высокоширотных радаров SuperDARN и модельным расчетам [Ruohoniemi and Baker, 1998; Shepherd and Ruohoniemi, 2000]. На рис. 1б также показаны данные регистрации E_z и вариации X -компоненты магнитного поля в обс. Хорзунд в более детальном масштабе. Четко видно, что каждое из 5-ти отрицательных бухтообразных возмущений в магнитном поле в HOR сопровождалось положительными отклонениями в E_z , однако линейного соотношения между амплитудами вариаций в E_z и в X -компоненте не отмечалось. Например, в интервале 01.20–02.00 UT незначительные возмущения в X -компоненте магнитного поля сопровождалось относительно большими отклонениями в E_z , а в интервале 02–03 UT наблюдалась обратная картина, и относительно большие магнитные возмущения сопровождалось незначительными отклонениями в E_z .

Заметим, что временной ход X -компоненты магнитного поля в HOR значительно отличался от временных вариаций в X -компоненте магнитного поля в авроральных широтах. Таким образом, в общих чертах временные вариации в E_z были зеркально подобны геомагнитной суббуре в авроральных широтах, однако детальные изменения в E_z контролировались локальными геомагнитными возмущениями в полярных широтах. На рис. 1б также видно, что временные вариации разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p), в основном, не совпадали с вариациями атмосферного электрического поля в обс. Хорзунд. Лишь в отдельных интервалах можно выделить некоторую тенденцию к относительному подобию вариаций в U_p и E_z .

На рис. 2 приведен пример положительных отклонений E_z во время развития полярной суббури в магнитоспокойных условиях 6 октября 2008 г. В авроральных широтах в это время суббури не наблюдалось. На верхнем графике рис. 2 также показаны

вариации разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p) по данным наблюдений на радарх SuperDARN. Видно, что в общих чертах временные вариации E_z зеркально повторяли временные вариации X -компоненты магнитного поля в obs. Хорзунд, а временные вариации разности потенциалов полярной шапки имели совершенно иной вид.

На рис. 3а приведен еще один пример положительных отклонений в E_z во время утренней суббури 4 сентября 2006 г. в магнитовозмущенных условиях при $Kp = 5$ в главную фазу небольшой магнитной бури, в максимуме которой индекс Dst был всего порядка -40 нТл. Суббурия, начавшись в авроральных широтах около 03 UT, постепенно перемещалась к северу. Возрастание E_z в obs. Хорзунд также началось около 03 UT, т.е. одновременно с суббурей в авроральной зоне. Перед суббурей наблюдалось значительное увеличение U_p до ~ 90 кВ. С перемещением суббури к полюсу наблюдалось уменьшение разности потенциалов поперек полярной шапки (до ~ 50 кВ). Общий ход временных вариаций E_z не совпадал ни с временными вариациями X -компоненты магнитного поля в HOR, ни с вариациями потенциала полярной шапки. Более того, резкое уменьшение U_p в 03.30–03.40 UT сопровождалось значительным возрастанием E_z . Заметим, что, как следует из метеонаблюдений, резкий пик в значениях E_z около 04.30 UT, может быть результатом локального увеличения облачности в это время.

Похожая ситуация наблюдалась и в главную фазу другой небольшой магнитной бури 25 ноября 2004 г. (рис. 3б). Перед полярной суббурей (03.10–03.30 UT) значения U_p возросли до ~ 110 кВ, а затем с началом суббури уменьшились до ~ 80 кВ и сопровождалась значительными положительными отклонениями в E_z , в общих чертах зеркально подобными временным вариациям X -компоненты геомагнитного поля в obs. Хорзунд. Кратковременное (04.20–04.40 UT) появление положительных значений B_z ММП привело (с ~ 10 мин запозданием) к затуханию суббури и кратковременному уменьшению U_p до ~ 50 кВ. В интервале 04.30–05.10 UT наблюдался редкий случай подобия временных вариаций E_z и U_p , которые были зеркально подобны вариациям X -компоненты магнитного поля в obs. Хорзунд.

Таким образом, анализ данных наблюдений показывает, что в obs. Хорзунд временные вариации в E_z в общих чертах, как правило, зеркально подобны авроральной геомагнитной суббуре, при этом детальные изменения в E_z чаще контролируются геомагнитными возмущениями в полярных широтах, т.е. “над головой”.

Далее для каждого анализируемого случая было определено положение проекции obs. Хорзунд относительно аврорального овала с помощью модели

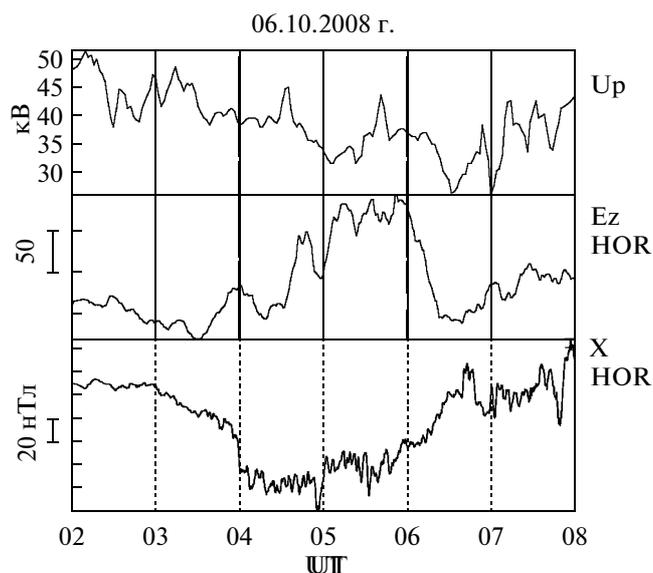


Рис. 2. Вариации разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p), E_z и X -компоненты магнитного поля в obs. Хорзунд 6 октября 2006 г.

определения положения авроральных высыпаний (AP) [<http://webapps.pgia.ru/apm-test/>]. Модель создана в Полярном Геофизическом Институте (ПГИ) на основе работы [Воробьев и Ягодкина, 2005]. В этой модели для каждого выбранного интервала времени в зависимости от уровня магнитной активности, определяемого по значениям Dst - и AE -индексов, может быть вычислено положение зон авроральных высыпаний различных типов в координатах: исправленная геомагнитная широта — геомагнитное время. Результаты использования этой модели показаны в верхней части рис. 4, где наиболее темная зона, расположенная экваториальнее аврорального овала, — зона диффузного высыпания (DAZ). Далее идет более светлая зона — это область мягких дискретных высыпаний аврорального овала (AOP), на ее полярной границе располагается область мягких диффузных высыпаний (SDP), показанная на рисунках наиболее темными областями. Заметим, что на web-странице ПГИ на графиках этой модели перечисленные выше зоны показаны разным цветом. Полярная граница зоны авроральных высыпаний по существу является экваториальной границей полярной шапки.

На рис. 4 показано, что во время трех рассмотренных суббурь obs. Хорзунд находилась в различных областях, а именно внутри полярной шапки, ее экваториальной границе или в авроральном овале. Так, на рис. 4а видно, что в случае 27.10.2005 г. (рис. 1) согласно модели ПГИ obs. Хорзунд в 01 UT располагалась вблизи экваториальной границы аврорального овала. Это подтверждается и по модели OVATION (рис. 4з) [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html], основанной на на-

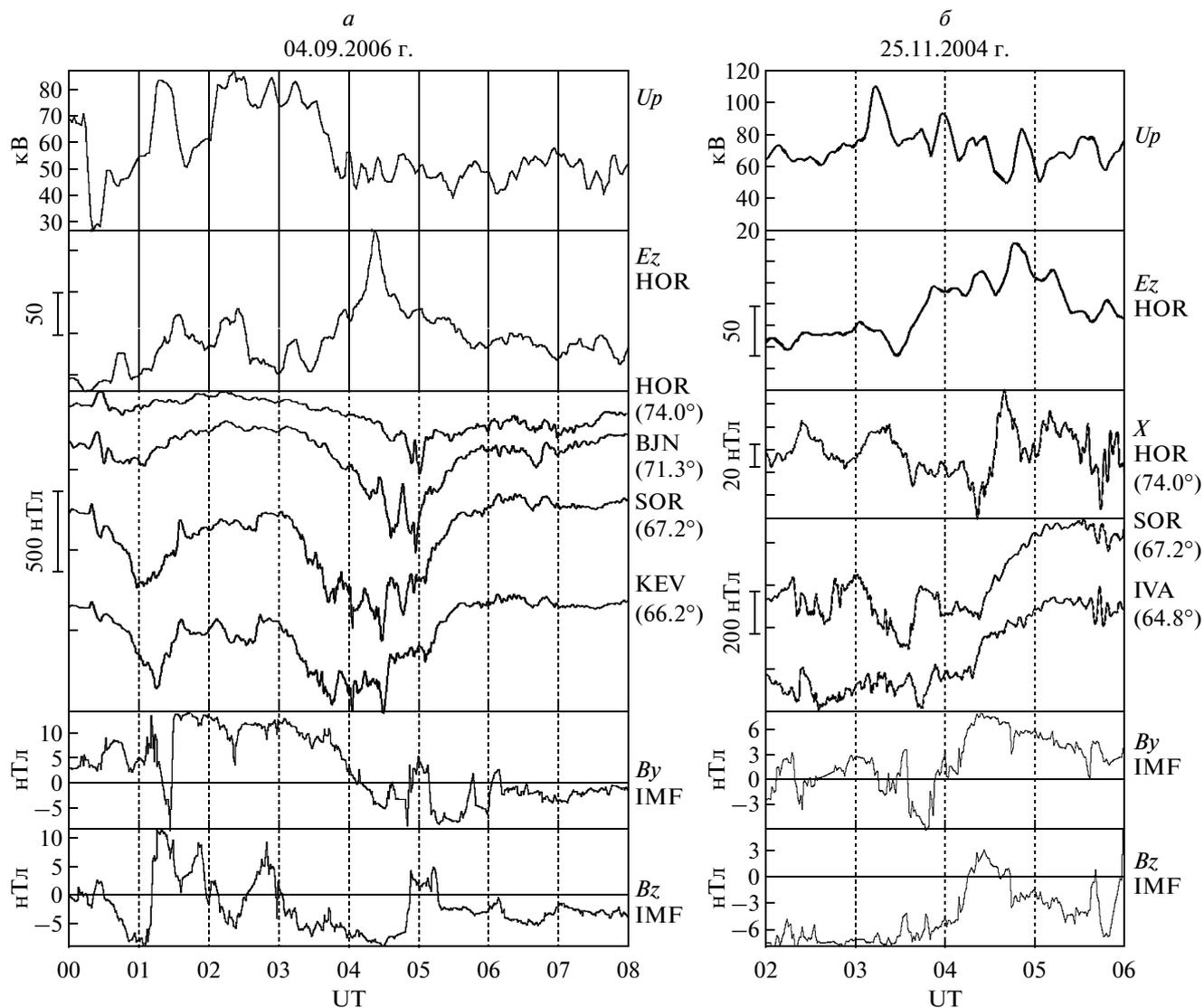


Рис. 3. Сверху вниз — вариации U_p , E_z и X -компоненты поля в HOR, SOR, IVA, а также B_y и B_z ММП, 4 сентября 2006 г. (а), 25 ноября 2004 г. (б).

блюдениях отдельных пролетов спутников через полярную шапку в выбранные интервалы времени. Совпадение результатов, полученных с применением различных моделей, свидетельствует о надежности утверждения, что обс. Хорзунд в анализируемый интервал времени находилась вблизи границы полярной шапки. Однако, несмотря на это временные вариации E_z (рис 1б) в обс. Хорзунд контролировались не вариациям U_p , а временными вариациями интенсивности электроджета над точкой наблюдения.

Похожая ситуация наблюдалась и в магнитоспокойный день 06.10.2008 г. (рис. 2), когда обс. Хорзунд согласно модели ПГИ (рис. 4б) и данным OVATION (рис. 4д) располагалась в области проекции аврального овала. В магнитоспокойное время размер полярной шапки был значительно уменьшен, и ее

экваториальная граница вблизи полдня находилась на геомагнитной широте около 80° . В таких условиях в утренние часы обс. Хорзунд оказалась внутри авральной зоны. Поэтому не удивительно, что временные вариации E_z в этом случае контролировались временными вариациями интенсивности полярной суббури, а не разностью потенциалов поперек полярной шапки.

Как видно на рис. 4в во время главной фазы магнитной бури 04.09.2006 г. экваториальная граница полярной шапки в утреннем секторе сместилась к более низким широтам, и обс. Хорзунд в 04.30 UT оказалась в области полярной шапки. Такой же положение проекции обс. Хорзунд получается и при использовании модели OVATION (рис. 4е). Общий подъем E_z в интервале 03.30–05.20 UT (рис. 3а) зеркально повторял форму магнитной бухты в

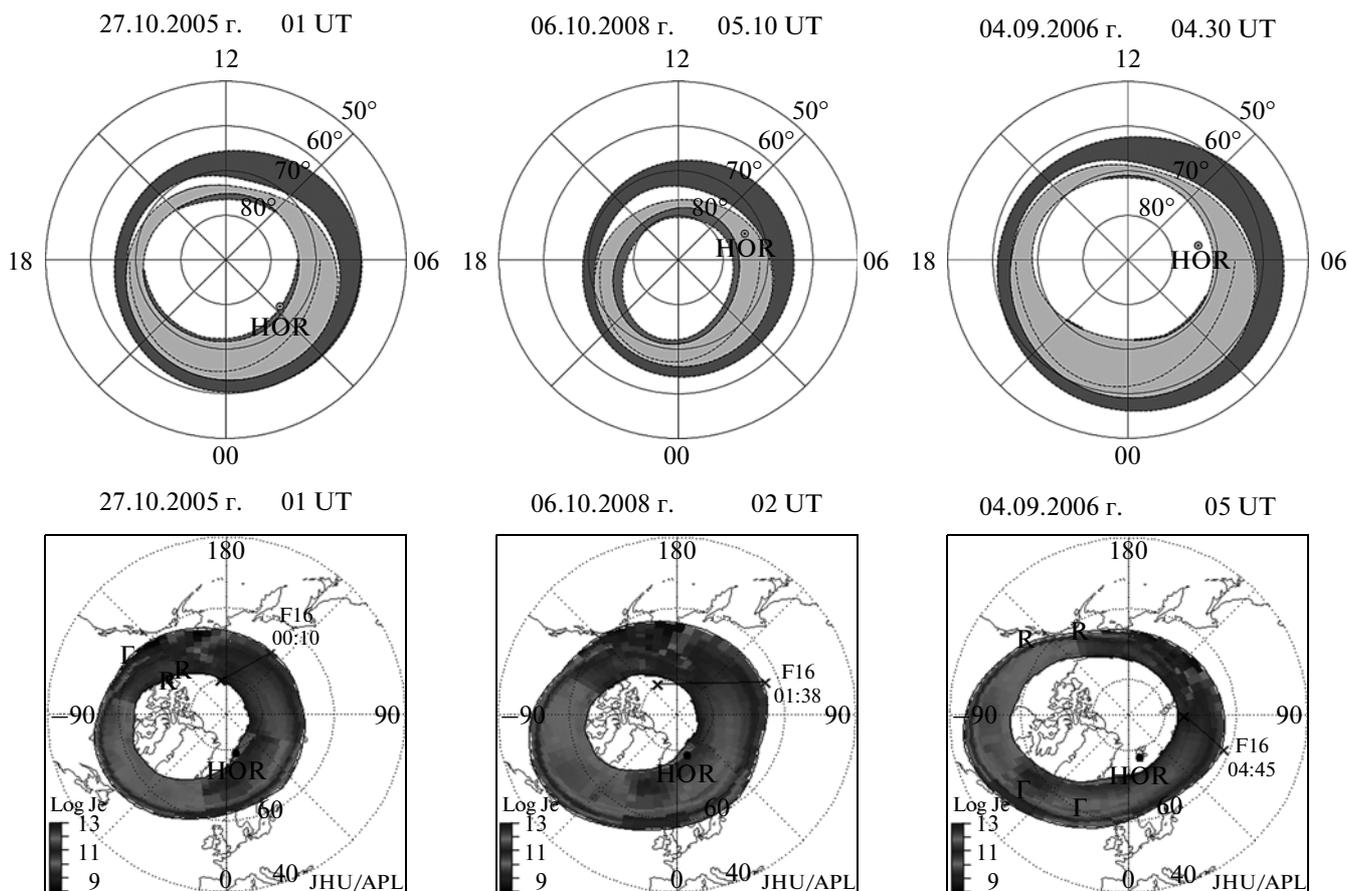


Рис. 4. Верхний ряд – положение различных зон авроральных высыпаний по модели ПГИ (подробности в тексте), дата и время указаны над каждым графиком; нижний ряд – положение obs. Хорзунд относительно аврорального овала по модели OVATION.

obs. BJN, находящейся в это время вблизи полярной границы авроральной зоны. Временные вариации E_z не совпадали с временными вариациями U_p несмотря на то, что obs. Хорзунд в это время располагалась в области полярной шапки. Такая же ситуация наблюдалась и во время главной фазы небольшой магнитной бури 25 ноября 2004 г.

Таким образом, наш анализ показывает, что расположение станции относительно границы полярной шапки мало влияет на особенности утренних и дневных вариаций E_z , которые в значительной степени контролируются развитием магнитосферных суббурь.

В вечернем секторе ситуация более сложная, и влияние магнитосферных суббурь на вариации E_z часто неоднозначно. Во многих случаях, особенно в сильно возмущенное время развитие суббурь в авроральных и полярных широтах вообще не проявлялось в вариациях E_z . Примеры таких случаев приведены в работе [Kleimenova et al., 2006]. В умеренно возмущенные периоды вечерние и ночные суббури

часто сопровождалось отрицательными отклонениями в E_z (уменьшение E_z).

Пример серии таких суббурь (3 ноября 2004 г.) приведен на рис. 5, где показаны вариации E_z , потенциала полярной шапки (U_p), B_z и B_y компоненты ММП, а также магнитограммы нескольких скандинавских станций. Видно, что общее уменьшение E_z в obs. Хорзунд началось после поворота B_z -компоненты ММП к югу и начала суббуревой активности в авроральных широтах (~18 UT, obs. SOR, IVA). При этом наблюдался рост значений U_p . Наиболее интенсивная суббуря отмечалась в авроральных широтах в ~22 UT после резкого поворота B_z -компоненты ММП к северу и смены знака B_y ММП с отрицательного на положительный. Такая ситуация в ММП привела к уменьшению U_p . В obs. Хорзунд возмущения магнитного поля в это время были незначительными и практически не проявились во временных вариациях E_z . Согласно AP модели ПГИ obs. Хорзунд проектировалась вблизи экваториальной границы полярной шапки.

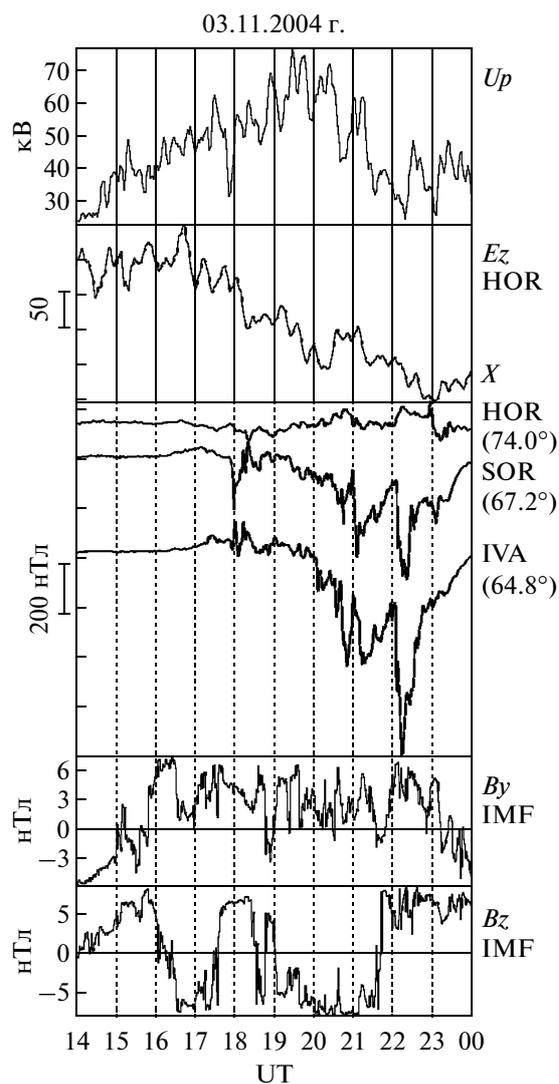


Рис. 5. Вариации U_p , E_z и X -компоненты поля в обс. Хорзунд для случая вечерних суббури 3 ноября 2004 г.

Итак, анализ данных наблюдений показал, что, вне зависимости от положения проекции обс. Хорзунд (в полярной шапке, на ее границе или в области аврорального овала), как правило, временные вариации E_z , особенно в утреннем секторе, значительно отличались от временных вариаций потенциала полярной шапки.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Обтекание магнитосферы солнечным ветром приводит к появлению крупномасштабной конвекции плазмы за счет вязкого взаимодействия и магнитного пересоединения. В результате чего на ионосферных высотах полярной шапки возникает электрическое поле, направленное с утренней стороны на вечернюю, при этом разность потенциалов поперек полярной шапки является важным пара-

метром состояния магнитосферы, определяющим количество энергии, поступающей в магнитосферу Земли. Разность потенциалов поперек полярной шапки изменяется от ~ 20 кВ в магнитоспокойных условиях до 50–80 кВ в условиях умеренной магнитной активности и, как показано в ряде работ [например, Troshichev et al., 1996; Морозов и Трошичев, 2008], линейно возрастает с увеличением южной компоненты B_z ММП ($B_z < 0$) и, соответственно, возрастанием PC -индекса полярной шапки.

Согласно представлениям ряда авторов, например, [Park, 1976; Tinsley et al., 1998] электрические поля конвекции могут проникать на тропосферные высоты и вызывать возмущения в приземном атмосферном электрическом поле (E_z). Эти эффекты будут зависеть от времени суток и расположения проекции наземной точки наблюдения относительно полярной шапки.

Обнаруженное зеркальное совпадение временного хода E_z в обс. Хорзунд и вариаций магнитного поля во время суббури в полярных широтах, по-видимому, может быть результатом проникновения к земной поверхности электрического поля полярного электроджета. Как показали наши исследования, во время развития суббури в полярных широтах, как правило, наблюдается уменьшение потенциала полярной шапки, что согласуется с выводами работ [Lyons et al., 2001; Bristow and Jensen, 2007].

В работах [Grocott et al., 2002, 2009; Provan et al., 2004] показано, что потенциал полярной шапки возрастает перед началом суббури, наблюдающейся в авроральной зоне, а затем по мере ее развития уменьшается за счет значительного увеличения ионосферной проводимости. В подготовительную фазу суббури преобладают эффекты пересоединения на дневной стороне, а в фазу развития суббури — на ночной. При этом, если суббуря начинается на геомагнитных широтах ниже 64° , то эффект возрастания конвекции в полярной шапке больше, чем в случае, когда суббуря начинается на более высоких широтах.

Обнаруженное зеркальное совпадение временного хода E_z в обс. Хорзунд и вариаций магнитного поля во время суббури в полярных широтах, по-видимому, может быть результатом проникновения к земной поверхности электрического поля полярного электроджета. Как показали наши исследования, во время развития суббури в полярных широтах, как правило, наблюдается уменьшение потенциала полярной шапки, что согласуется с выводами работ [Lyons et al., 2001; Bristow and Jensen, 2007; Grocott et al., 2002, 2009]. Проводимость ионосферы в области электроджета увеличивается, что приводит к уменьшению электрического поля [например, Yeoman et al., 2000].

Обнаруженные эффекты, по-видимому, во многом объясняются расположением обс. Хорзунд на геомагнитной широте 74° , где возможно конкури-

рующее влияние на вариации приземного электрического поля как электроджета, так и полярной ионосферной конвекции. Эффекты на более низких и более высоких широтах, вероятно, могут значительно отличаться. Так, по данным работ [Frank-Kamenetsky et al., 2001; Морозов и Трошичев, 2008; Круглов и др., 2010] вблизи геомагнитного полюса в обл. Восток наблюдается зависимость E_z от B_z и B_y компонент ММП, поэтому задачей наших будущих исследований является проведение сопоставлений одновременных наблюдений в обл. Хорзунд и Восток.

4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что временные вариации приземного атмосферного электрического поля (E_z) на геомагнитной широте 74° (обс. Хорзунд) в утреннем секторе в значительной мере контролируются временными вариациями электроджета вне зависимости от расположения этой обсерватории относительно границы полярной шапки и слабо зависят от временных вариаций разности потенциалов поперек полярной шапки (U_p). Можно предположить, что это является результатом проникновения электрического поля электроджета на тропосферные высоты.

В вечернем секторе ситуация может быть сложнее и требует дальнейших детальных исследований.

Работа выполнена в рамках Российско-Польского научного сотрудничества при частичной поддержке гранта РФФИ № 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.
- Бандилет О.И., Чернышова С.П., Шефтель В.М. Вариации атмосферного электрического поля в высокоширотной зоне во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. С. 628–632. 1985.
- 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.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 4. С. 467–473. 2005.
- Жданов Р.Ф., Моисеев В.Г., Новиков А.М., Соколов В.Д., Франк-Каменицкий А.В., Чернышева С.П., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. Влияние электрических полей магнитосферной конвекции на вариации атмосферного электрического поля в высокоширотной зоне // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 24. № 5. С. 844–846. 1984.
- 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.
- Круглов А.А., Франк-Каменицкий А.В. Исследование связи электрического потенциала высокоширотной ионосферы с вертикальной составляющей приземного электрического поля // Тр. Ин-та Прикладной геофизики. Вып. 88. С. 54–59. 2010.
- 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.
- 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.
- Angelo D., Iversen I.B., Madsen M.M. Influence of dawn-dusk potential drop across the polar cap on the high-latitude atmospheric vertical current // Geophys. Res. Lett. V. 9. P. 773–776. 1982.
- Belova E., Kirkwood S., Tammet H. The effect of magnetic substorms on near-ground atmospheric currents // Ann. Geophys. V. 18. P. 1623–1629. 2001.
- Bristow W.A., Jensen P. A superposed epoch study of SuperDARN convection observations during substorms // J. Geophys. Res. V. 112. A06232, doi: 10.1029/2006JA012049, 2007.
- 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 field 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.
- Grocott A., Cowley S.W.H., Sigwarth J.B., Watermann J.F., Yeoman T.K. Excitation of twin-vortex flow in the night-side high-latitude ionosphere during an isolated substorm // Ann. Geophys. V. 20. P. 1577–1601. 2002.
- Grocott A., Wild J.A., Milan S.E., Yeoman T.K. Superposed epoch analysis of the ionospheric evolution during substorm: onset latitude dependence // Ann. Geophys. V. 27. P. 591–600. 2009.
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Nikiforova N.N., Michnowski S., Kubicki M. Atmospheric electric field variations at polar latitudes (obs. Hornsund, Spitsbergen) // Proc. 3-rd Intern. Conf. “Geophysical research in Spitsbergen Archipelago”, Barentsburg, Norway, 3–05 October, 2006. P. 11–19. 2006.
- Kozyreva O.V., Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., Michnowski S., Kubicki M. Electric air-earth vertical current pulsations at Hornsund during polar substorms: Case study // Proc. 13-th Intern. Conf. Atmosp. Electricity (ICAE). 2007, Beijing. P. 29–33. 2007.
- Kubicki M., Results of atmospheric electricity and meteorological observations S. Kalinowski geophysical observatory at wider // Pubs. Inst. Geophysics Polish Acad. Sci. D-56. (333). P. 3–7. 2001.

- Lyons L.R., Ruohoniemi J.M., L.G. Substorm-associated changes in large-scale convection during the November 24, 1996 Geospace Environment Modeling event, *J. Geophys. Res.* V. 106. P. 397–406, doi:10.1029/1999JA000602, 2001.
- Michnowski S., Szymanski A., Nikiforova N.N., Kozyreva O.V., Ermolenko D.Yu., Zielkowski K. On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric-electric field changes in Arctic station Hornsund, Spitsbergen // *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* D-35(238). P. 83–96. 1991.
- Michnowski S. Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions // *J. Geophys. Res.* V. 103. (D12). P. 13939–13048. 1998.
- Olson D.E. The evidence for auroral effects on atmospheric electricity // *Pure Appl. Geophys.* V. 84. P. 118–138. 1971.
- Park C.G. Downward mapping of high-latitude ionospheric electric field to the ground // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 168–174. 1976.
- Provan G., Lester M., Mende S.B., Milan S. E. Statistical study of high-latitude plasma flow during magnetospheric substorms // *Ann. Geophys.* V. 22. P. 3607–3624. 2004.
- Ruohoniemi J.M., Baker K.B. Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 20797–20811. 1998.
- Shepherd S.G., Ruohoniemi J.M. Electrostatic potential patterns in the high latitude ionosphere constrained by SuperDARN measurements // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 23005–23014. 2000.
- Tinsley B.A., Liu W.-P., Rohrbaugh R.P., Kirkland M.W. South Pole electric field responses to overhead ionospheric convection // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 26137–26146. 1998.
- Troshichev O., Hayakawa H., Matsuoka A., Mukai T., Tsuruda K. Cross polar cap diameter and voltage as a function of PC index and interplanetary quantities // *J. Geophys. Res.* V. 101. P. 13429–13435. 1996.
- Yeoman T.K., Davies J.A., Wade N.M., Provan G., Milan S.E. Combined CUTLASS, EISCAT and ESR observations of ionospheric plasma flows at the onset of an isolated substorm // *Ann. Geophys.* V. 18. P. 1073–1087. 2000.