

УДК 551.594

ОТКЛИК МАГНИТОСФЕРНОЙ БУРИ В АТМОСФЕРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ СРЕДНИХ ШИРОТ

© 2021 г. С. В. Анисимов¹, *, Н. М. Шихова¹, Н. Г. Клейменова²

¹Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: anisimov@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

После доработки 28.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Выполнены исследования отклика сильных магнитных бурь в вариациях электрического поля приземной атмосферы средних широт по данным многолетних наблюдений аэроэлектрического (Ez) и геомагнитного полей на среднеширотной геофизической обс. Борок. За период 1998–2015 гг. выделено 19 сильных и очень сильных магнитных бурь с минимумом Dst -индекса < -100 нТл и максимальным значением индекса $Kp > 7$, соответствующих невозмущенным метеоусловиям нижней атмосферы (т.е. условиям “хорошей погоды”) в обс. Борок. Показано, что влияние магнитной бури на изменения электрического поля приземной атмосферы эффективнее проявляется в дневное околополуденное время. Обнаружена статистически значимая вариация напряженности аэроэлектрического поля, характеризующаяся возрастанием величины Ez на временном интервале ± 4 ч относительно времени минимума Dst -вариации магнитной бури.

DOI: 10.31857/S0016794021020024

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле атмосферы обусловлено совокупностью физических процессов разделения, формирования и переноса объемных электрических зарядов, происходящих в широком диапазоне пространственно-временных масштабов [Чалмерс, 1974]. Принято считать что, квазистационарное состояние глобальной электрической цепи устанавливается в результате действия атмосферных грозных генераторов, поддерживающих разность потенциалов между нижней ионосферой и поверхностью океана и земной коры [Анисимов и Мареев, 2008; Williams and Marceev, 2014].

В рамках модели глобальной электрической цепи основными параметрами, определяющими электрическое состояние атмосферы, служат потенциал ионосферы, сопротивление столба атмосферы, плотность вертикального электрического тока, напряженность электрического поля, значение полярных проводимостей, а также высотные профили указанных атмосферных параметров. Согласно моделям глобальной электрической цепи вертикальный электрический ток свободной невозмущенной атмосферы связывает ионосферу с приземной атмосферой и обуславливает электродинамический механизм воздействия электрических полей магнитосферно-ионосфер-

ных источников на электрические процессы нижней атмосферы. В глобальной электрической цепи базовым параметром, определяющим электрическое состояние невозмущенной атмосферы, служит потенциал ионосферы [Mühleisen, 1977; Slyunyaev et al., 2015]. В свою очередь, одним из планетарных источников изменений ионосферного потенциала в глобальной электрической цепи является геомагнитная буря, обусловленная взаимодействием возмущенного солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Наибольшее воздействие геомагнитные возмущения и сопутствующие изменения электрических полей и токов ионосферы могут оказывать на атмосферное электрическое поле в авроральных и полярных широтах, что доказано результатами натурных высокоширотных наблюдений вариаций напряженности электрического поля приземной атмосферы Ez [Olson, 1971; Shaw and Hunsucker, 1977; Апсен и др., 1988; Anisimov et al., 1991; Burns et al., 1995; Michnowski, 1998; Belova et al., 2001; Frank-Kamenetsky et al., 2001; Никифорова и др., 2003; Kruglov et al., 2010; Kleimenova et al., 2018]. В качестве убедительного примера такого воздействия следует упомянуть результаты наземных аэроэлектрических (Ez) наблюдений на полярной обс. Хорзунд (HOR, 74° CGLAT), расположенной на архипелаге Шпицберген. Показано, что, как правило, развитие магнитосферной

суббури в утреннем секторе магнитосферы сопровождается положительными отклонениями напряженности приземного электрического поля независимо от нахождения точки наблюдения в зоне полярной шапки или на ее границе, что позволяет сделать вывод о проникновении к земной поверхности электрических полей полярной магнитосферной конвекции [Клейменова и др., 2010].

Результаты анализа среднесуточных вариаций атмосферного электрического поля E_z , наблюдаемых на obs. Хорзунд, расположенной вблизи границы полярной шапки, и на obs. Какиока (КАК, 28.8° CGLAT), расположенной в приэкваториальных широтах, показали, что в магнито-спокойных и слабо возмущенных условиях среднесуточные вариации E_z в основном определяются пространственным расположением точки наблюдения относительно фокусов конвективных вихрей эквивалентной токовой системы $DP0$. При этом, вариации E_z на obs. Какиока в значительной мере контролируются экваториальным электроджетом, максимальным в дневные часы, а на obs. Хорзунд — авроральным электроджетом, максимальным в ночные и ранние утренние часы местного времени [Клейменова и др., 2012].

Особый интерес представляет исследование влияния геомагнитных возмущений на вариации электрического поля приземной атмосферы в средних широтах. Эффект сильных магнитных бурь наблюдался в вариациях напряженности и динамике спектров мощности вариаций электрического поля приземной атмосферы в obs. Паратунка на Камчатке (52° CGLAT) с одновременной регистрацией метеорологических и геофизических данных [Смирнов и др., 2013; Смирнов, 2014; Михайлова и др., 2014]. По результатам анализа данных наземных наблюдений атмосферного электрического поля (E_z) на среднеширотной obs. Свицер вблизи Варшавы (52° CGLAT) во время трех магнитных бурь впервые обнаружен эффект главной фазы магнитной бури в дневных среднеширотных вариациях E_z [Клейменова и др., 2008]. Значительные (с амплитудой ~100–300 В/м) вариации напряженности электрического поля наблюдались на obs. Свицер днем одновременно с началом развития суббури в ночном секторе авроральных широт (obs. Колледж). Обнаруженные эффекты сопровождалось усилением межпланетного электрического поля во время главной фазы магнитной бури, развитием магнитосферных суббурь и вторжением энергичных электронов в ночную авроральную ионосферу. Подробный анализ вариаций атмосферного электрического поля был проведен для 14 магнитных бурь. Были обнаружены вариации электрического поля приземной атмосферы связанные с главной фазой развития геомагнитного возмущения на дневной стороне магнитосферы, а также повышение интенсивности короткопериодных пульсаций аэро-

электрического поля одновременно с повышением суббуревой активности в ночном секторе [Kleimenova et al., 2009]. По результатам аэроэлектрических наблюдений, проведенных в Израиле на широте около 35° CGLAT [Elhalel et al., 2014] в периоды магнитных бурь, показано, что амплитуда вариаций тока возрастала в периоды геомагнитных возмущений на порядок по сравнению с изменениями в спокойной геомагнитной обстановке.

Следует особо подчеркнуть, что наземные аэроэлектрические наблюдения выполняются в электрически активной среде: приземном атмосферном слое и пограничном атмосферном слое. Отметим, например, что положительный тренд напряженности аэроэлектрического поля может быть результатом формирования слоя приподнятой температурной инверсии [Анисимов и др., 2012], и обусловлен аккумуляцией объемного заряда в подинверсном слое верхней границы атмосферного пограничного слоя. Скорость увеличения напряженности поля при этом составила в среднем 100 В/(м ч). Электрическое состояние приземной атмосферы, невозмущенной грозами, осадками и электрически активной облаками, формируется совокупностью генераторов, действующих в турбулентной среде с неоднородной и нестационарной электрической проводимостью [Анисимов и Шихова, 2008; Анисимов и др., 2014, 2018]. В свою очередь электрическая проводимость атмосферы определяется ионизацией молекул космическими лучами и продуктами распада радона и торона, размерами и концентрацией аэрозольных частиц и их взаимодействием с атмосферными ионами [Анисимов и др., 2017]. Результаты модельных расчетов электрического состояния атмосферного пограничного слоя и данные натурных наземных аэроэлектрических наблюдений [Anisimov et al., 2014, 2017, 2018] показали, что электродинамика нижней атмосферы, стационарная величина плотности вертикального электрического тока, которой определяется действием глобальной электрической цепи, связана, прежде всего, с формированием и транспортом объемных электрических зарядов, а также изменениями электрической проводимости среды.

Цель данной работы — исследование влияния сильных, очень сильных и гигантских магнитных бурь на вариации атмосферного электрического поля в средних широтах по данным многолетних натурных наблюдений аэроэлектрического и геомагнитного полей на геофизической obs. Борок и проведение статистически значимой оценки проявления глобальных геомагнитных возмущений в атмосферном электрическом поле свободной, невозмущенной метеорологическими воздействиями, приземной атмосферы средних широт.

2. ГЕОМАГНИТНЫЕ И АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ОБСЕРВАТОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ. АЛГОРИТМ ОТБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Основой решения поставленной задачи послужила база данных (<http://geodata.borok.ru>), сформированная по результатам непрерывных натуральных наблюдений геомагнитного и атмосферного электрического (аэроэлектрического) полей, выполненных в 1999–2015 гг., на среднеширотной геофизической обс. ГО Борок ИФЗ РАН (географические координаты: 58°04' N; 38°14' E; CGLAT = 54°) в условиях отсутствия промышленных аэрозольных загрязнений и электромагнитных помех.

Информационно-измерительный комплекс ГО Борок ИФЗ РАН оборудован современными цифровыми магнитометрами для проведения наблюдений главного магнитного поля Земли (включая абсолютные измерения), геомагнитных вариаций и короткопериодных геомагнитных пульсаций [Анисимов и Дмитриев, 2003]. Наблюдения главного магнитного поля выполняются с использованием протокола и оборудования международной сети магнитных станций INTERMAGNET. Для решения задачи поиска отклика геомагнитных возмущения в электрическом поле приземной атмосферы использовались данные трехкомпонентного fluxgate-магнитометра LEMI-018, включенного в локальную наблюдательную сеть Обсерватории с GPS-привязкой данных к абсолютному времени и системой сбора данных обсерваторских наблюдений [Anisimov et al., 2008]. Fluxgate-магнитометр позволяет регистрировать вариации магнитного поля с разрешением 0.1 нТл. Частота сбора данных составляет 1 Гц. Для привязки данных к мировому времени используется GPS-приемник, подключенный непосредственно к системе сбора данных. Оперативные результаты наблюдений вариаций магнитного поля накапливаются на сервере базы данных. Каждый час программное обеспечение системы сбора данных архивирует и копирует данные на сервере базы данных. С целью обнаружения отклика геомагнитных бурь в атмосферном электрическом поле средних широт был сформирован 17-летний амплитудно-временной ряд часовых средних величин напряженности вариаций геомагнитного поля, зарегистрированных на среднеширотной геофизической обс. Борок.

Регулярные обсерваторские натурные наблюдения атмосферного электрического поля выполняются на геофизической обс. Борок с 1987 года. В качестве базового датчика напряженности вертикальной компоненты атмосферного электрического поля используется электростатический флюксметр, специально разработанный и изго-

товленный для проведения долгосрочных непрерывных обсерваторских наблюдений. Пороговая чувствительность прибора в полосе частот (0–10) Гц составляет около 1 В/м. Тактовая частота системы сбора – 10 Гц. Электростатический флюксметр, наряду с возможностью измерений пульсаций поля в широкой полосе частот с высокой чувствительностью, позволяет регистрировать главную составляющую аэроэлектрического поля и ее медленные вариации, что необходимо для понимания природы атмосферного электричества, обнаружения унитарной вариации, исследования длиннопериодных годовых и сезонных вариаций, а также изучения процессов формирования и эволюции глобальной электрической цепи. В исследовании для дальнейшего анализа использовались амплитудно-временные ряды величины напряженности аэроэлектрического поля с минутным разрешением.

Атмосферная электродинамика, наряду с действием глобальных генераторов электрического поля и тока, определяется действием совокупности факторов, формируемых метеорологическими условиями нижней атмосферы, такими как облачность, осадки, туман, величина и направление скорости ветра. Информационно-измерительный обсерваторский комплекс оснащен современным метеорологическим оборудованием (пиранометр СМР-3; температурный профиломер МТП-5; доплеровский радар Волна-3; метеостанции М 49 и WS-2500; метеоконтакты Метео-2 и АМК-03), позволяющим разработать физически обоснованный алгоритм отбора данных наблюдений электрического поля приземной атмосферы в невозмущенных условиях “хорошей погоды”. Цифровые ряды данных температуры, скорости и направления ветра, влажности, атмосферного давления, освещенности, полученные по стандартным методикам метеорологических наблюдений в приземном слое, а также соответствующие высотные профили метеорологических величин с тактовой частотой 10 Гц, использовались для предварительного отбора и обработки результатов наблюдений атмосферного электрического поля.

Для обнаружения возможного влияния магнитных бурь на среднеширотные вариации атмосферного электрического поля использовались также геомагнитные данные Потсдамского центра наук о Земле (<http://www.gfz-potsdam.de>) за 1999–2015 гг. Были выбраны 90 сильных, очень сильных и гигантских магнитных бурь с минимумом *Dst*-индекса < –100 нТл и индексом *Kp* > 7. Заметим, что величина магнитной бури определяется значением *Dst*-индекса (*Disturbance storm-time*), которое характеризует интенсивность кольцевого тока, усиливающегося во время магнитной бури и вызывающего понижение геомагнитного поля на земной поверхности (отрицательные зна-

Таблица 1. Геомагнитные бури при условиях невозмущенной атмосферы (“хорошей погоды”) в точке аэроэлектрических наблюдений: Dst -вариации и коэффициенты корреляции

№ п/п	День	Месяц	Год	Час (Dst_{\min} UT)	Dst_{\min} (нТл)	Коэффициент корреляции R , $Ez-Dst$	Коэффициент корреляции R , $Ez-Dst$ (фаза 1)	Коэффициент корреляции R , $Ez-Dst$ (фаза 2)
1	22	09	1999	23:00	-173	-0.21	-0.11	0.59
2	22	10	1999	06:00	-237	-0.23	-0.36	-0.49
3	24	05	2000	08:00	-147	0.35	0.53	0.69
4	12	08	2000	09:00	-234	-0.58	-0.7	-0.88
5	05	10	2000	00:00	-181	0.43	0.58	0.26
6	31	03	2001	08:00	-387	-0.56	-0.5	-0.15
7	21	10	2001	21:00	-187	-0.37	0.61	0.29
8	30	10	2003	00:00	-383	-0.13	-0.86	0.95
9	27	07	2004	14:00	-170	0.49	0.79	0.42
10	07	11	2004	06:00	-368	-0.37	-0.29	-0.75
11	18	01	2005	08:00	-103	-0.5	-0.61	0.15
12	08	05	2005	18:00	-110	0.02	0.19	-0.01
13	15	05	2005	08:00	-247	-0.71	-0.77	0.58
14	30	05	2005	13:00	-113	0.24	-0.23	-0.01
15	24	08	2005	11:00	-184	0.01	0.11	0.18
16	11	09	2005	10:00	-139	0.31	-0.04	0.63
17	09	03	2012	07:00	-145	-0.04	-0.57	-0.28
18	17	03	2015	22:00	-223	0.57	0.52	0.73
19	23	06	2015	04:00	-204	0.55	0.36	0.38

чения Dst -индекса), например, [Gonzalez et al., 1994]. Следовательно, максимум интенсивности магнитной бури соответствует времени минимального значения Dst -индекса.

Далее, для выбранных бурь был проведен отбор данных аэроэлектрических непрерывных наблюдений обс. Борок, соответствующих условиям “хорошей погоды” (отсутствие осадков, облачность менее 5 баллов, ветер – менее 5 м/с, электрическое поле приземной атмосферы неотрицательно) на интервале ± 10 ч относительно времени минимума Dst -вариации (т.е. ± 10 ч от максимума магнитной бури). В результате такого отбора для дальнейшего анализа осталось всего 19 магнитных бурь, список и данные которых приведены в таблице 1.

Результаты исследования динамики электрического поля приземной атмосферы [Анисимов и др., 2013] показали, что суточная вариация Ez в средних широтах во многом определяется действием локальных и региональных генераторов, связанных, например, с конвективным переносом объемных зарядов в локальный полдень. Задача обнаружения отклика магнитных бурь в электрическом поле приземной атмосферы предполагает исключение локальных и региональных эффектов. С этой целью для каждого из 19 ото-

бранных временных интервалов магнитных бурь рассчитывалась среднемесячная вариация напряженности атмосферного электрического поля (Ez_{Mean}), которая при дальнейшем анализе вычиталась из наблюдаемой вариации Ez . Таким образом, дальнейший анализ выполнен для амплитудно-временных рядов разности (ΔEz) наблюдаемой (Ez) и среднемесячной (Ez_{Mean}) вариаций на интервале ± 10 ч относительно времени минимума Dst вариации для каждой из 19 рассматриваемых магнитных бурь.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ, СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1а, 1б приведены примеры регистрограмм одновременных аэроэлектрических и геомагнитных наблюдений на среднеширотной геофизической обс. Борок во время двух очень сильных магнитных бурь: 31.03.2001 г. (а) и 15.05.2005 г. (б), а также соответствующие Dst -вариации геомагнитного поля (<http://www.gfz-potsdam.de>). В обоих событиях минимум Dst (т.е. максимум интенсивности магнитной бури) наблюдался в 09 UT, т.е. в локальный геомагнитный полдень (MLT = UT + 3). На рисунке 1а, 1б представлены также среднеме-

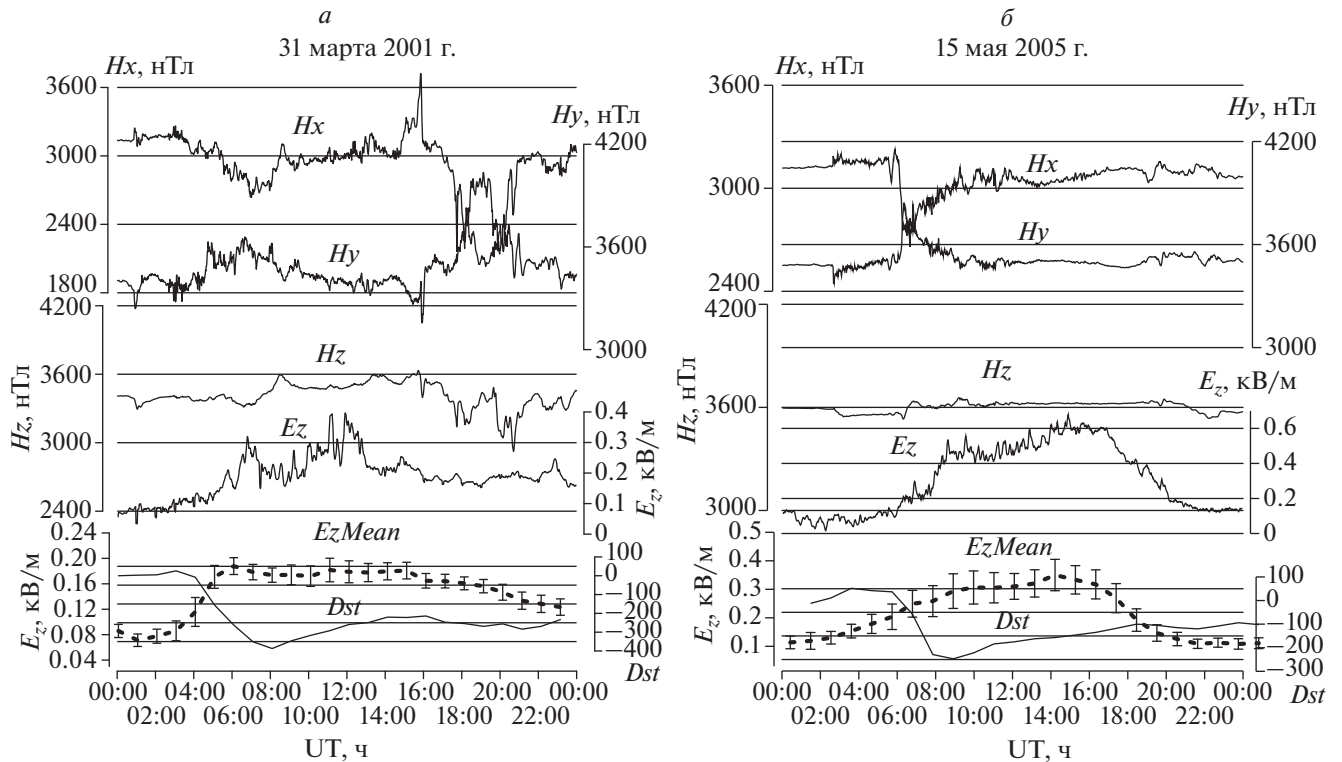


Рис. 1. Вариации атмосферного электрического поля (E_z), возмущения геомагнитного поля (H_x , H_y , H_z) по результатам наблюдений геофизической обс. Борок 31 марта 2001 г. (а) и 15 мая 2005 г. (б), суточные вариации E_z по данным “хорошей погоды” (E_z Mean) по результатам наблюдений геофизической обс. Борок в марте 2001 г. (а) и мае 2005 г. (б), соответствующие Dst -вариации геомагнитного поля (www.gfz-potsdam.de).

сячные суточные вариации атмосферного электрического поля (E_z Mean), рассчитанные по результатам обсерваторских наблюдений в условиях “хорошей погоды” за март 2001 г. и май 2005 г.

Из рисунков следует, что значимые медленные вариации атмосферного электрического поля возрастают во время магнитной бури, т.е. находятся в противофазе с Dst . В магнитную бурю 31 марта 2001 г. (рис. 1а) значительные возмущения в геомагнитном и атмосферном электрическом поле наблюдались днем (04–09 UT, 07–12 MLT) в главную фазу бури, когда абсолютные значения $|Dst|$ возрастали. Этот результат подтверждает полученные ранее данные в среднеширотной обс. Свидер [Клейменова и др., 2008].

В ночное время (~18–22 UT, 21–01 MLT) в восстановительную фазу магнитной бури, когда значения $|Dst|$ оставались большими (~250 нТл), но стабильными, значительных вариаций в E_z не наблюдалось, несмотря на наличие в это время геомагнитных возмущений. В главную фазу магнитной бури 15 мая 2005 г. (рис. 1б), которая развивалась также в местное дневное время (05–09 UT, 08–12 MLT), как и в предыдущем случае отмечалось усиление возмущений в геомагнитном и атмосферном электрическом поле, которые про-

должались и в раннюю восстановительную фазу бури (09–12 UT). В ночное время (18–24 UT) в восстановительную фазу этой бури при относительно стабильных значениях Dst (~100 нТл) геомагнитные возмущения были слабыми, значимых вариаций в E_z не регистрировалось, наблюдался медленный тренд уменьшения абсолютной величины напряженности атмосферного электрического поля. В каждом из рассматриваемых примеров регистрируемое атмосферное электрическое поле положительно. Проведенный расчет величин коэффициента корреляции R вариаций среднечасовых значений напряженности атмосферного электрического поля и Dst -вариаций дает оценку $R_1 = 0.84$ для события 31 марта 2001 г. и $R_2 = 0.78$ для события 15 мая 2005 г. за приведенный на рис. 1 суточный интервал регистрации.

Для детального спектрально-временного анализа суточных распределений интенсивности вариаций аэроэлектрического (E_z) и геомагнитного (компонента H_x) полей по спектральным масштабам в диапазоне (1–119) мин использовалось непрерывное вейвлет-преобразование с базисным вейвлетом Морле и построением двумерных вейвлет-диаграмм [Астафьева, 1996; Дремин и др., 2001]. На рисунке 2а, 2б представлены результаты

вейвлет-анализа для 31.03.2001 г. (а) и 15.05.2005 г. (б). Видно, что в районе локального геомагнитного полдня отмечаются усиление вариаций аэроэлектрического поля, которые, предположительно, могут быть обусловлены, прежде всего, конвективным режимом атмосферного пограничного слоя в околополуденное время и соответствующим переносом объемных электрических зарядов в окрестности точки наблюдения [Анисимов и др., 2014, Anisimov et al., 2017]. Спектр характеризуется наличием нескольких частотных мод вследствие интенсивного перемешивания объемных зарядов, вмороженных в турбулентные вихри пограничного слоя атмосферы [Анисимов и др., 2014]. Вариации в аэроэлектрическом и геомагнитном поле не показывают видимой когерентности.

На рисунке 3 приведен один из примеров среднеширотной вариации разности (ΔE_z) наблюдаемой (E_z) и среднемесячной ($E_z Mean$) величин напряженности аэроэлектрического поля на интервале ± 10 ч относительно времени минимума Dst -вариации во время гигантской ($|Dst| \geq 350$ нТл) геомагнитной бури 31 марта 2001 г. Возрастание величины напряженности аэроэлектрического поля E_z при уменьшении Dst -вариации характерно для большинства проанализированных событий. Для приведенного на рис. 3 события уменьшение величины E_z за 2 ч до минимума Dst , вероятно, может быть связано с характерными особенностями развития геомагнитной бури 31 марта 2001 г. и взаимодействия B_z -компонеты Межпланетного Магнитного Поля (ММП) с магнитосферой.

На рисунке 4 показаны Dst -вариации геомагнитного поля и соответствующие вариации ΔE_z атмосферного электрического поля для сильных и очень сильных магнитных бурь с минимумом Dst -вариации в околополуденное (в табл. 1 это события № 2, 4, 11, 16 и 17) и ночное время (события № 1, 7, 12, 18 и 19). Вариации ΔE_z получены как разность наблюдаемых вариаций E_z и соответствующих среднемесячных кривых $E_z Mean$ напряженности аэроэлектрического поля, регистрируемых в условиях “хорошей погоды”, предполагающих положительную величину напряженности поля. Заметим, что отрицательные значения разности ΔE_z , присутствующие на рис. 4, обусловлены соотношением наблюдаемой напряженности поля и соответствующей среднемесячной величины в условиях невозмущенной атмосферы для каждого из используемых среднечасовых значений. Сравнение приведенных наблюдаемых кривых показывает, что влияние магнитной бури на изменения электрического поля приземной атмосферы эффективнее проявляется в дневное околополуденное время.

Для получения количественной оценки возможной связи крупномасштабных длиннопериодных возмущений в геомагнитном и аэроэлектрическом полях были рассмотрены корреляционные функции амплитудно-временных рядов анализируемых ΔE_z и Dst – вариаций длиной 21 ч (± 10 ч относительно времени минимума Dst) для 19 указанных в табл. 1 магнитных бурь. Рассчитанные коэффициенты корреляции среднечасовых значений ΔE_z и Dst на временном интервале ± 10 ч относительно времени минимума Dst -вариации приведены в последних колонках табл. 1. Для получения количественных оценок отклика магнитной бури в атмосферном электрическом поле приземной атмосферы во время главной и восстановительной фаз каждой анализируемой магнитной бури выполнены расчеты коэффициентов взаимной корреляции среднечасовых значений ΔE_z и Dst на временном интервале $+10$ ч (фаза 1) и -10 ч (фаза 2) относительно времени минимума Dst . Полученные значения приведены в таблице 1 (столбцы “Коэффициент корреляции $R E_z-Dst$ фаза 1 и фаза 2” соответственно). Фаза 1 соответствует главной фазе магнитной бури, а фаза 2 – восстановительной фазе бури.

Следует заметить, что, если для восстановительной фазы 10 ч интервал вполне приемлем, поскольку эта фаза бури может быть достаточно продолжительной, то длительность главной фазы в разных бурях может колебаться от 2-х до 15-ти и более часов. Следовательно, 10-ти часовой интервал (фаза 1) может включать не только главную фазу, но и начальную фазу бури и даже ее внезапное начало. Этим можно объяснить большой интервал значений коэффициента корреляции в фазе 1. Несмотря на это, из табл. 1 видно, что фазу 1, если она наблюдалась в дневное время (события № 2, 4, 6, 10, 11, 13, 14, 16, 17), то коэффициенты корреляции были отрицательными. Исключение составляют 4 случая: событие № 3, когда главная фаза бури началась всего за 2 ч до ее максимума (минимума Dst -вариации), событие № 9, когда наблюдалась 2-х ступенчатая магнитная буря с двумя суперсуббурями (интенсивностью более 3 тыс. нТл), и событие № 15, когда, как и в событии № 3, главная фаза бури началась всего за 2 ч до ее максимума.

В событиях, когда развитие главной фазы происходило в вечернее и ночное время (т.е. максимум бури отмечался ночью), коэффициент корреляции был положительным (события № 5, 7, 12, 18, 19). Исключением была широко известная гигантская магнитная буря 30.10.2003 (события № 8), когда главная фаза бури развивалась при огромной скорости солнечного ветра (до 2 тыс. км/с), значении B_z -компоненты ММП до -30 нТл и сопровождалось огромной планетарной суперсубурей интенсивностью около 4 тыс. нТл. В эту бурю все геомагнитные события развивались аномально.

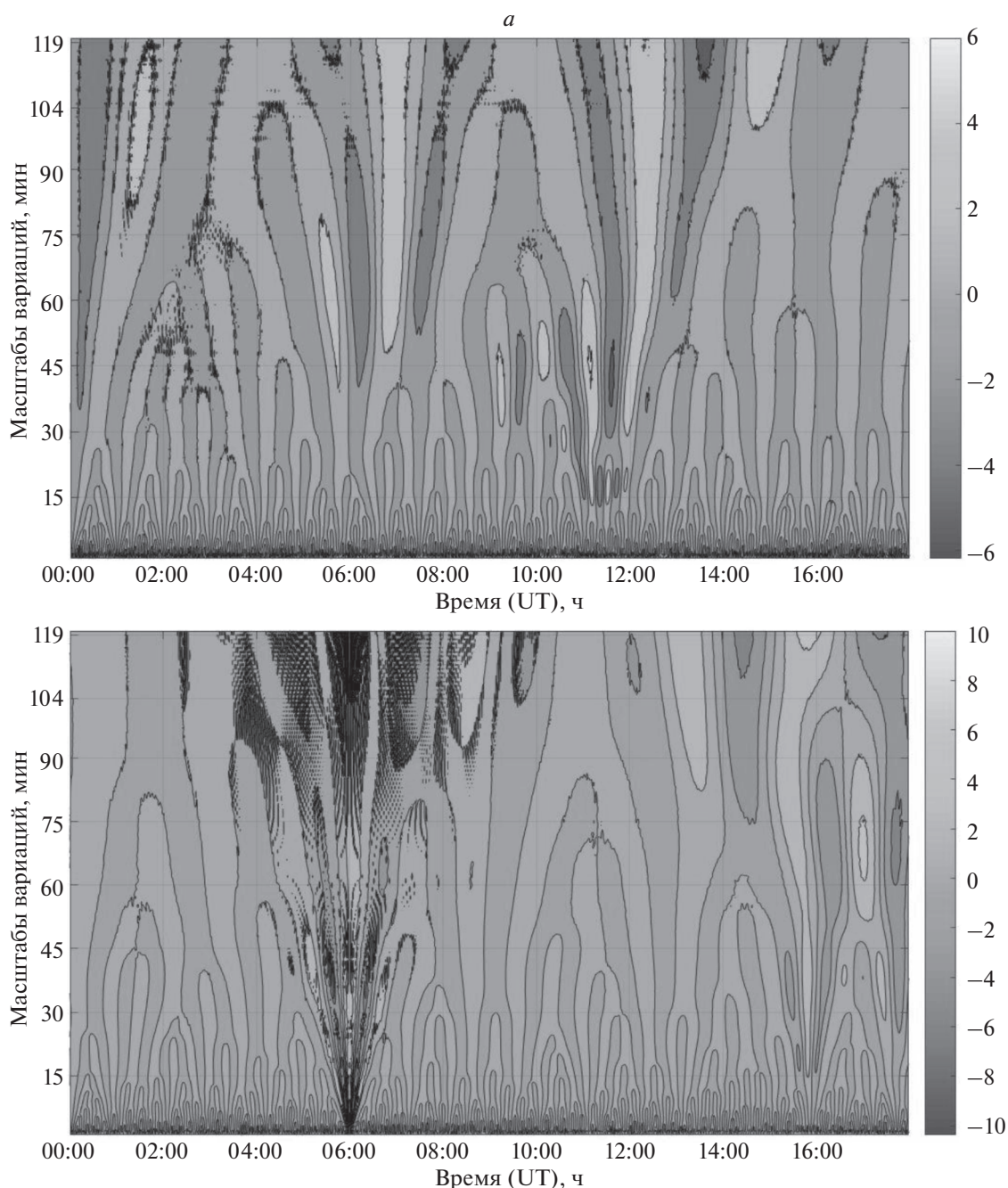


Рис. 2. (а) – Суточные диаграммы непрерывного вейвлет-разложения напряженности атмосферного электрического E_z (вверху) и геомагнитного H_x (внизу) полей по результатам наблюдений ГО Борок 31 марта 2001 года. (б) – Суточные диаграммы непрерывного вейвлет-разложения напряженности атмосферного электрического (вверху) и геомагнитного (внизу) полей по результатам наблюдений ГО Борок 15 мая 2005 года.

В фазу восстановления магнитной бури (фаза 2) в 12 событиях знак корреляции был положительным и в 7 – отрицательным, т.е. в большинстве анализируемых случаях знак корреляции был положительным. В качестве примера можно рассмотреть событие № 13 (15.05.2005 г.), представленное на рис. 3б.

Поскольку в восстановительную фазу магнитных бурь возможно появление различных неоднородностей в солнечном ветре и ММП, то для выявления конкретной причины знака корреляции необходимо проведение детального анализа условий в околоземном пространстве и геомагнитных возмущений в каждом из рассматриваемых событий.

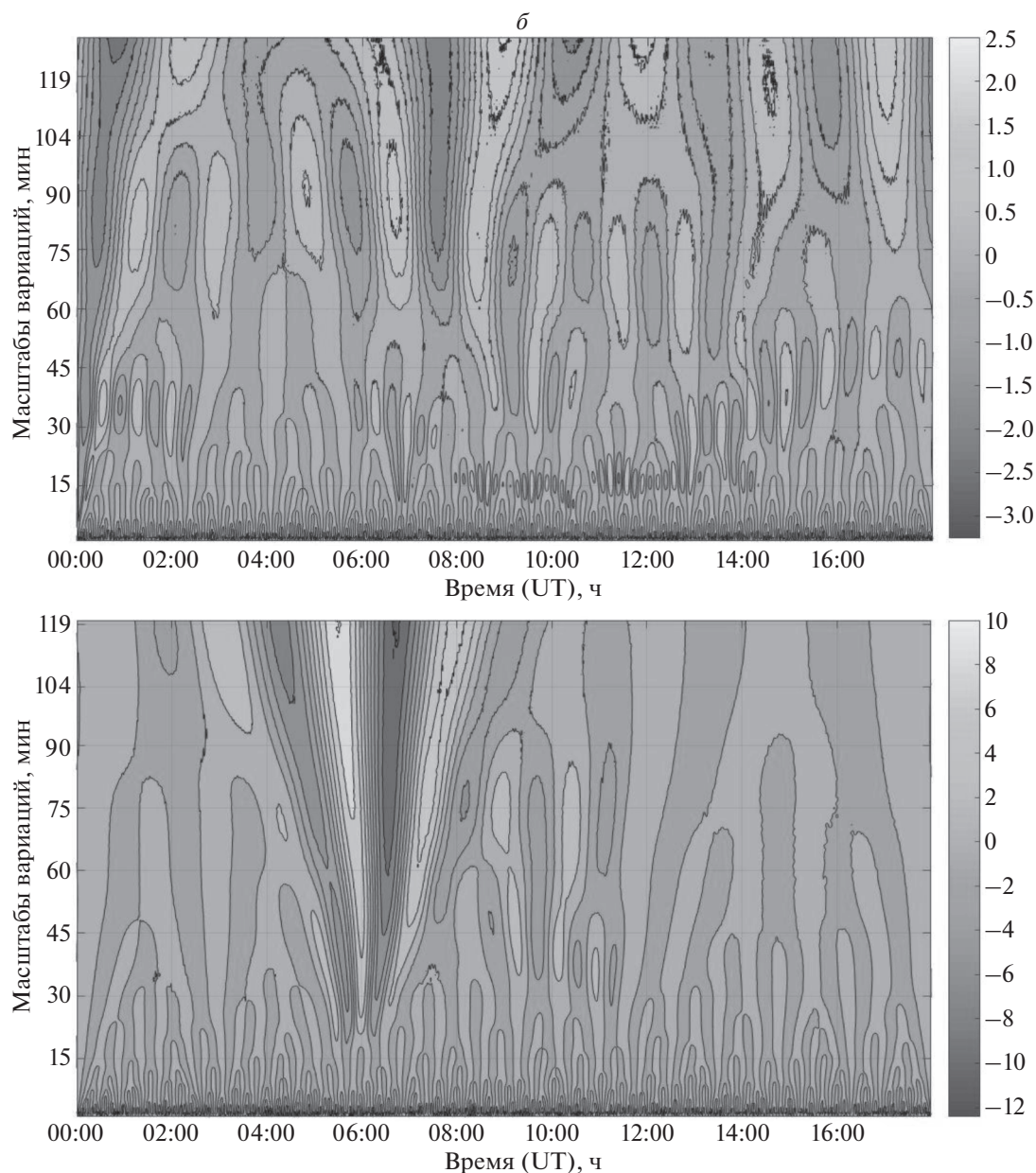


Рис. 2. Окончание.

Обращает внимание наличие высоких значений коэффициентов корреляции R во временном интервале 09–15 UT, что может быть связано с высокими значениями ионосферных электрических полей и их эффективным проникновением в приземную атмосферу. При этом разный знак коэффициента корреляции в дневное и ночное время в главную фазу магнитной бури может свидетельствовать о различных направлениях ионосферных электрических полей, проникающих в нижнюю атмосферу.

Для оценки значимости обнаруженного отклика геомагнитных бурь в атмосферном элек-

трическом поле средних широт использовался метод наложенных эпох. Рассматривались 19 амплитудно-временных рядов среднечасовых значений E_z длиной 21 ч, выделенных согласно условиям “хорошей погоды”. За нулевую точку анализа принималось время UT минимума Dst -вариации ($Tdst_{min}$), относительно которого рассчитывалась вариация среднечасовых значений напряженности атмосферного электрического поля во временной окрестности ± 10 ч от нулевой точки для каждой магнитной бури.

Вариация среднечасовых значений напряженности атмосферного электрического поля ΔE_z ,

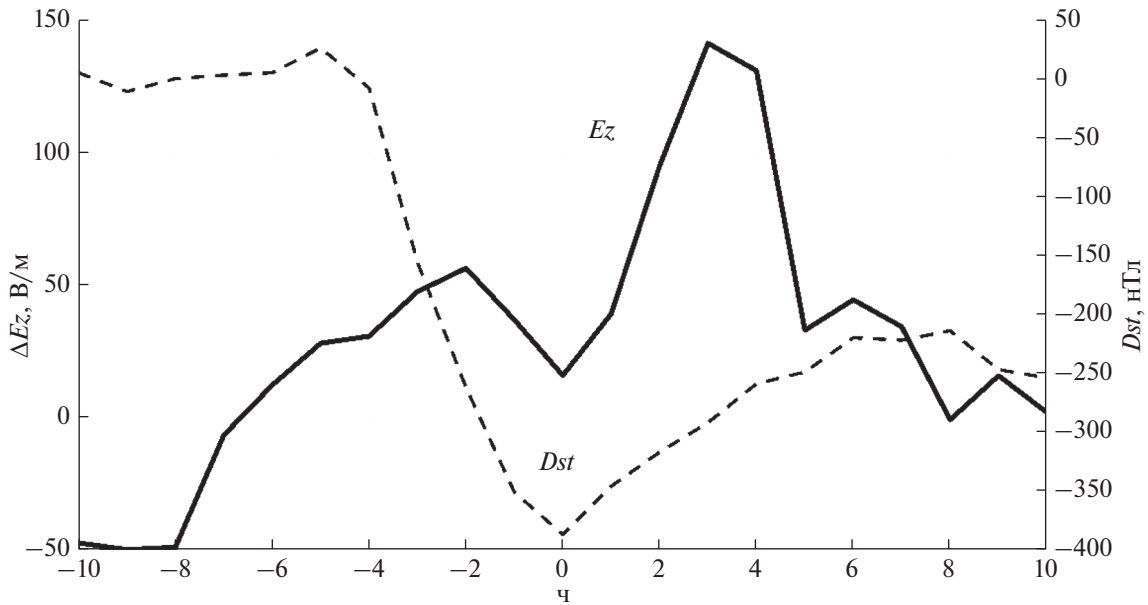


Рис. 3. Вариация атмосферного электрического поля (E_z) по результатам наблюдений геофизической обс. Борок 31 марта 2001 г. и соответствующая геомагнитная Dst -вариация. Нулевая отметка на оси времени соответствует времени максимума модуля $|D_{st}|$ – вариации для каждого из событий.

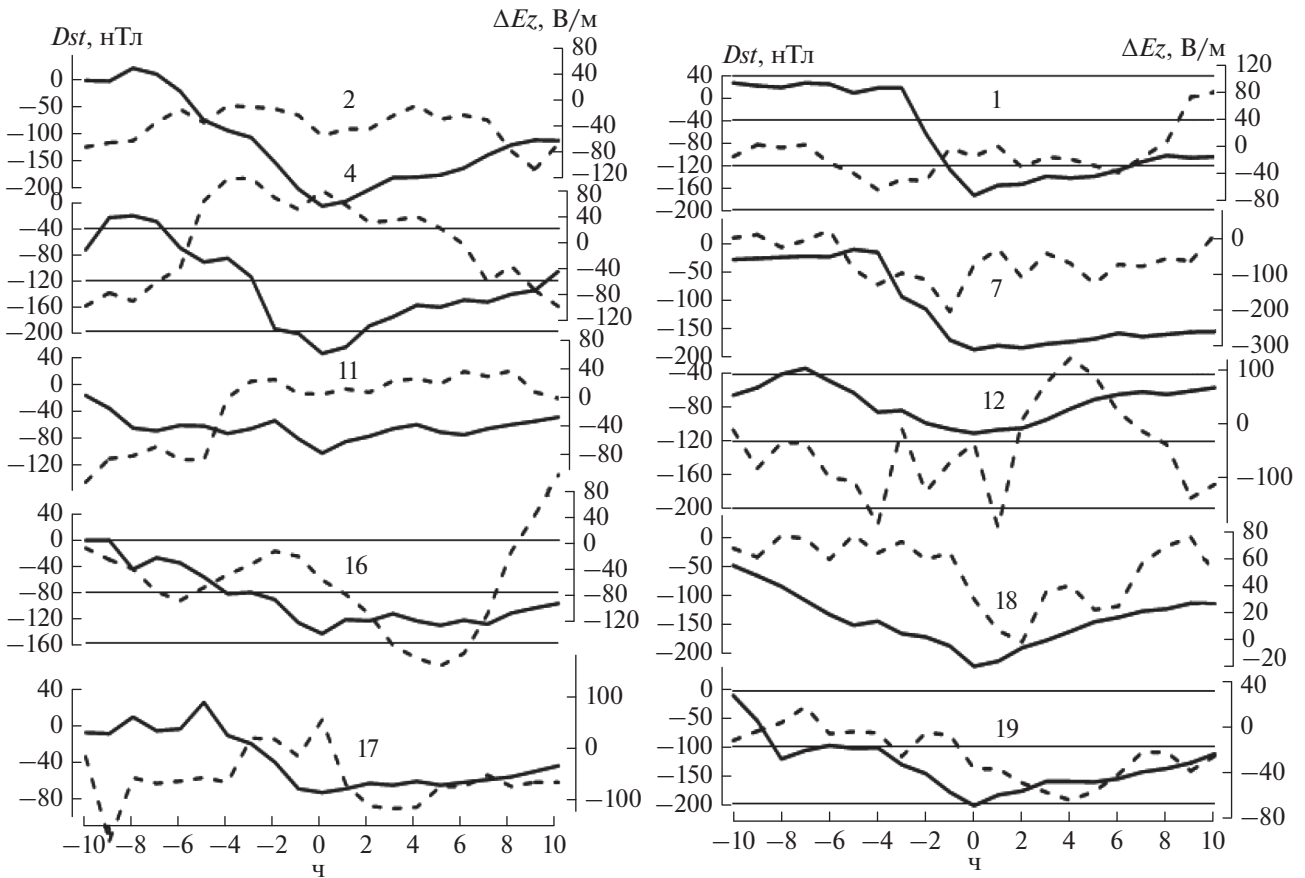


Рис. 4. Вариации атмосферного электрического поля (ΔE_z – штриховая линия) по результатам наблюдений геофизической обс. Борок в условиях “хорошей погоды” и соответствующие сильным и очень сильным геомагнитным бурям Dst -вариации (сплошная линия) во временном интервале ± 10 ч относительно минимума Dst -вариации. Номера кривых на рис. соответствуют табл. 1. Нулевая отметка на оси времени соответствует времени максимума модуля $|D_{st}|$ -вариации для каждого из событий.

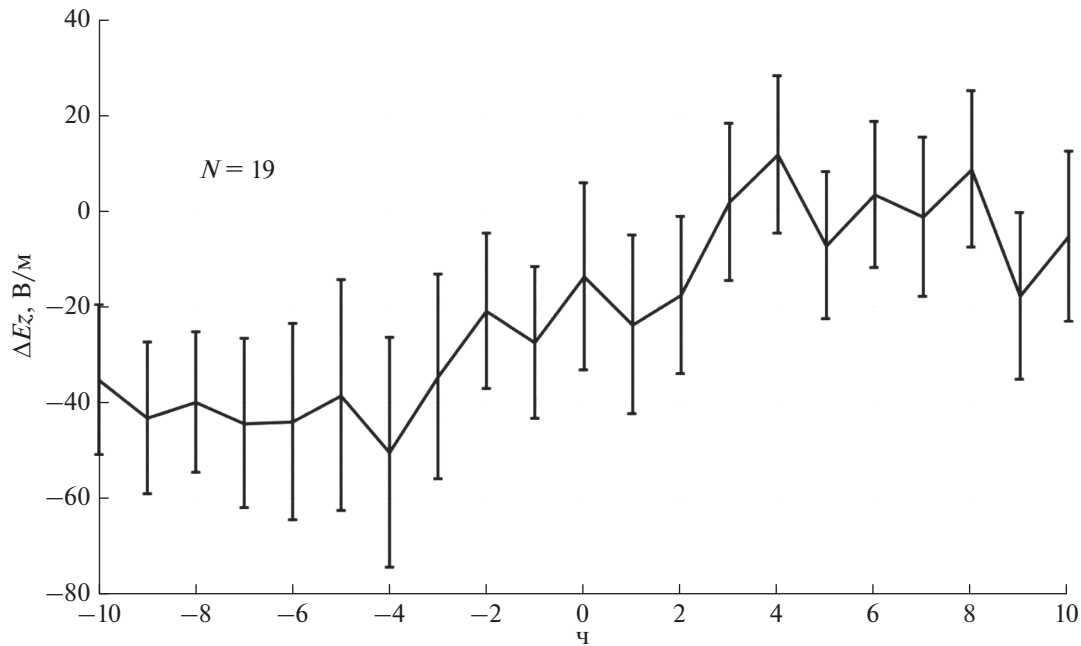


Рис. 5. Вариация приращений среднечасовых значений напряженности электрического поля (ΔE_z) приземной невозмущенной атмосферы, полученная методом “наложенных эпох”, для 19 геомагнитных бурь ($|D_{st}| \geq 100$ нТл) по результатам наблюдений геофизической обс. Борок 1999–2015 гг. (табл. 1). Нулевая отметка на оси времени соответствует времени максимума модуля $|D_{st}|$ -вариации для каждого из событий. Вертикальными линиями обозначена стандартная ошибка среднего значения ΔE_z .

полученная как средняя величина разностей наблюдаемых среднечасовых значений E_z и соответствующих среднемесячных вариаций $E_z Mean$, рассчитанная методом наложенных эпох по 19 событиям (табл. 1), приведена на рис. 5. На временном интервале ± 10 ч от нулевой точки наблюдаются изменения аэроэлектрического поля с минимумом предшествующим нулевой точке в интервале $-10 \dots -4$ ч, возрастанием на интервале ± 4 ч и последующим максимумом (“выполаживанием”) на интервале $+4 \dots +10$ ч. Вертикальными линиями указана стандартная ошибка среднего значения ΔE_z . Достоверность различий средних значений до и после характерного времени анализируемого события $Tdst_{min}$ определялась согласно критерию Стьюдента, применение которого позволило выявить различие на уровне значимости $p = 0.1$. Согласно критерию Стьюдента, средние значения напряженности аэроэлектрического поля для 19 анализируемых событий, соответствующие времени до и после временного интервала ± 4 ч относительно времени $Tdst_{min}$, различаются на уровне значимости $p = 0.1$. Следовательно, средние значения напряженности аэроэлектрического поля в соответствующих временных интервалах до и после выбранной нулевой точки различаются с вероятностью 90%.

Таким образом, Dst -вариация физически определяет статистически значимый отклик

сильных, очень сильных и гигантских магнитных возмущений в атмосферном электрическом поле средних широт. Результаты анализа позволяют утверждать, что обнаружена статистически значимая вариация напряженности аэроэлектрического поля, характеризующаяся возрастанием величины E_z на временном интервале ± 4 ч относительно времени минимума Dst -вариации геомагнитной бури. Обнаруженная вариация напряженности атмосферного электрического поля E_z свидетельствует о наличии статистически значимого отклика электрического поля приземной атмосферы средних широт на магнитные бури.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены исследования отклика сильных магнитных бурь в вариациях электрического поля приземной атмосферы средних широт по данным многолетних натурных наблюдений аэроэлектрического и геомагнитного полей на среднеширотной геофизической обс. Борок. За период 1998–2015 гг. выделено 19 сильных магнитных бурь с $Kp = 7_+ - 9_0$, соответствующих невозмущенным метеоусловиям нижней атмосферы (условиям “хорошей погоды”).

Обнаружен статистически достоверный отклик атмосферного электрического поля на сильные, очень сильные и гигантские магнитные бури

с $Dst < -100$ нТл. Показано, что Dst -вариация геомагнитного поля может служить характерным геофизическим параметром, определяющим значимый отклик геомагнитных возмущений в атмосферном электрическом поле средних широт.

Установлено, что для большинства проанализированных амплитудно-временных рядов E_z характерно возрастание величины напряженности атмосферного электрического поля, которое соответствует положительному тренду Dst -вариации с последующим увеличением E_z до максимальных величин при отрицательном тренде Dst -вариации. Показано согласно критерию Стьюдента, что с вероятностью 90% можно утверждать различие средних значений напряженности аэроэлектрического поля в соответствующих временных интервалах до и после выбранной нулевой точки минимума Dst -вариации, т.е. в главную и восстановительную фазу магнитной бури.

Проведенные исследования позволяют заключить, что интенсивные магнитные бури сопровождаются статистически достоверным откликом вариаций приземного аэроэлектрического поля в средних широтах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по программе госзадания института физики Земли Российской академии наук и Геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00233).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Дмитриев Э.М. Информационно-измерительный комплекс и база данных Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН. 44 с. 2003.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8–18. 2008.
- Анисимов С.В., Шихова Н.М. Вариабельность электрического поля невозмущенной атмосферы средних широт // Геофиз. исслед. № 3. С. 25–38. 2008.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М. Формирование электрически активных слоев атмосферы с температурной инверсией // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 48. № 4. С. 442–452. 2012.
- Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Изв. вузов. Радиофизика. 2013 Т. 56 № 11–12. С. 787–802.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана. Т. 50. № 4. С. 445–454. 2014.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макарушин А.П., Шихова Н.М. Объемная активность радона

и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. № 1. С. 155–170. 2017.

– Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Прохорчук А.А. Глобальные и региональные составляющие электричества невозмущенной нижней атмосферы средних широт // Физика Земли. № 5. С. 104–114. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0002333718050034>

– Ансен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П., Четаев Д.Н., Шефтель В.М. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука, 150 с. 1988.

– Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физ. Наук. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. 1996.

– Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук. Т. 171. № 3. С. 465–501. 2001.

– Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 5. С. 650–659. 2008.

– Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С. Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 1. С. 51–60. 2010.

– Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Оджимек А., Мальшева Л. М. Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 52. № 4. С. 494–500. 2012.

– Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э. Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях спектров мощности электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 5. С. 691–700. 2014.

– 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 аэрномия. Т. 42. № 1. С. 32–39. 2003.

– Смирнов С.Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. // ДАН. Т. 456. № 3. С. 342–346. 2014.

– Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 4. С. 532–545. 2013.

– Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.

– Anisimov S.V., Morgunov V.A., Troitskaya V.A. Substorms potential gradient of the atmospheric electric field // Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. D-35 (238). P. 77–81. 1991.

– Anisimov S.V., Chulliat A., Dmitriev E.M. Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory // Russ. J. Earth. Sci. V. 10. ES3007. 2008.

<https://doi.org/10.2205/2007ES000227>

- *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M.* Space charge and aerelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // *Atmos. Res.* V. 135–136. P. 244–254. 2014.
- *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A.* Electrodynamical properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res.* V. 194. P. 119–129. 2017.
- *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // *Boundary-Layer Meteorology.* V. 167. № 2. P. 327–348. doi.: 2018.
<https://doi.org/10.1007/s10546-017-0328-0>
- *Belova E., Kirkwood S., Tamm H.* The effect of magnetic substorms on near-ground atmospheric currents // *Ann. Geophys.* V. 18. № 12. P. 1623–1629. 2000.
- *Burns G.B., Hesse M.H., Parcell S.K., Makachowski S., Cole K.D.* The geoelectric field at Davis stations, Antarctica // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. P. 1783–1789. 1995.
- *Elhalel G., Yair Y., Nicoll K., Price C., Reuveni Y., Harri-son R.G.* Influence of short-term solar disturbances on the fair weather conduction current // *J. Space Weather Space Clim.* V. 4. A26. 2014.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2014022>
- *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.
- *Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M.* What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* V. 99(A4). P. 5771–5792. 1994.
<https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- *Kleimenova N., Kozyreva O., Kubicki M., Michnowski S.* Variations of the mid-latitude atmospheric electric field (Ez) associated with geomagnetic disturbances and Forbush decreases of cosmic rays // *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* D-73 P. 1–10. 2009.
- *Kleimenova N.G., Odzimek A., Michnowski S., Kubicki M.* Geomagnetic storms and substorms as space weather influence on atmospheric electric field variations // *Sun and Geosphere.* V. 13. № 1. P. 101–107. 2018.
<https://doi.org/10.31401/SunGeo2018.01.07>
- *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. 33-th Ann. Seminar ‘Physics of Auroral Phenomena’.* Ap-arity, P. 171–173. ISBN 978-5-91137-136-4. 2010.
- *Michnowski S.* Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions // *J. Geophys. Res.* V. 103. D12. P. 13939–13948. 1998.
- *Mühleisen R.* The global circuit and its parameters // *Electrical processes in atmospheres*, ed. by H. Dolezalek and R. Reiter, – Darmstadt, Germany. P. 467–476. 1977.
- *Olson D.E.* The evidence for auroral effects on atmospheric electricity // *Pure Appl. Geophys.* V. 84. P. 118–138. 1971.
- *Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A.* An overview of Earth’s global electric circuit and atmospheric conductivity // *Space Science Rev.* V. 137. P. 83–105. 2008.
- *Shaw G.E., Hunsucker R.D.* A study of possible correlation between fire-weather electric field and auroral activity // *Electrical process in atmospheres*, ed. by H. Dolezalek and R. Reiter, – Darmstadt, Germany. P. 576–581. 1977.
- *Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Zhidkov A.A.* On the variation of the ionospheric potential due to large-scale radioactivity enhancement and solar activity // *J. Geophys. Res. Space. Phys.* V. 120. P. 7060–7082. 2015.
- *Williams E., Mareev E.A.* Recent progress on the global electrical circuit // *Atmos. Res.* V. 135–136. P. 208–227. 2014.