

УДК 550.385.37

ВАРИАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В НОЯБРЕ 2004 г.

© 2013 г. С. Э. Смирнов¹, Г. А. Михайлова², О. В. Капустина²

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
п. Паратунка (Камчатский край)

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
г. Троицк, г. Москва

e-mail: sergey@ikir.kamchatka.ru; yumikh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

После доработки 21.09.2012 г.

Исследованы эффекты геомагнитных бурь 8 и 10 ноября 2004 г. в вариациях напряженности и спектров мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке в комплексе с одновременно наблюдаемыми метеорологическими и геофизическими явлениями. Показано, что последовательность сильных солнечных вспышек вызвала аномальное повышение температуры и влажности воздуха. Это привело к возбуждению аномально сильных грозовых процессов в атмосфере во время бури 8 ноября и не позволило на этом фоне выделить эффекты, связанные с космическими лучами. Во время бури 10 ноября на фоне слабых вариаций метеорологических величин обнаружено возрастание напряженности и интенсивности спектров мощности электрического поля накануне бури 10 ноября с последующим ослаблением этих величин в день бури. Предположено, что эти эффекты связаны с действием космических лучей на токи глобальной электрической цепи. Показано, что в спектре мощности электрического поля влияние Форбуш-эффекта ГКЛ проявляется также в усилении компоненты с периодом $T \sim 48$ ч, а в вариациях влажности — в усилении компоненты с $T \sim 24$ ч. Показано отсутствие причинно-следственных связей между вариациями напряженности электрического поля и горизонтальной компонентой геомагнитного поля как в условиях “хорошей погоды”, так и во время бури 10 ноября. Обнаружен отрицательный суточный перепад атмосферного давления на второй день после геомагнитных бурь 8 и 10 ноября.

DOI: 10.7868/S0016794013040147

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию эффектов солнечной активности и связанных с ней геомагнитных бурь в атмосферном электричестве высоких и средних широт посвящена довольно обширная литература [см., например, Апсен и др., 1988]. Для нас представляют интерес эффекты мощных солнечных вспышек, сопровождаемых геомагнитными бурями с Форбуш-эффектом ГКЛ, в приземном слое атмосферы на средних широтах над континентом. К сожалению, эти результаты очень ограничены и довольно противоречивы. Это может быть связано не только с особенностями физических процессов в приземной атмосфере для индивидуальных геомагнитных бурь, но и с выбором, например, места регистрации, нулевого дня в методе наложенных эпох, интервалов усреднения данных (от минут до суток), а также с состоянием атмосферы до и во время бури. Не менее противоречивы предлагаемые возможные механизмы этих эффектов. Ниже кратко представлены некоторые результаты этих исследований.

Так, в работах [Markson, 1981; Марксон, 1982] впервые была предложена гипотеза влияния солнечной активности на атмосферное электричество. Суть ее сводится к тому, что под действием космических лучей (одного из главных ионизаторов атмосферы) изменяется проводимость глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Глобальная электрическая цепь представляет собой замкнутую токовую систему, главным генератором в которой, согласно модели сферического конденсатора, являются тропические грозы (Глобальный грозовой генератор, ГГГ). Токи этого генератора через сопротивление воздуха выше него текут в нижнюю ионосферу и замыкаются через невозмущенную удаленную атмосферу и поверхность Земли. Эти токи обеспечивают заряд сферического конденсатора, верхняя стенка которого находится под электрическим потенциалом V_1 относительно нулевого потенциала Земли. В нижней части этой цепи на высотах до ~ 2 км основным ионизатором атмосферы является естественная радиоактивность почвы, а на высотах ~ 15 – 20 км (максимум в распределении галактических кос-

мических лучей) — ГКЛ. Проникая в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу, они способны вызвать ионизацию, которая ведет к усилению токов ГЭЦ. Именно поэтому для изучения влияния солнечной и геомагнитной активностей стали использоваться одновременные наблюдения параметров атмосферного электричества и ГКЛ либо в горах, либо на изолированных островах с использованием аппаратуры на самолетах или аэростатах, т.е. выше обменного слоя атмосферы, в котором существенное влияние на вариации напряженности электрического поля оказывают локальные конвективные и турбулентные процессы. В таких условиях в работе [Markson, 1981] была обнаружена положительная корреляция между электрическим потенциалом нижней ионосферы и интенсивностью ГКЛ. Вместе с тем в других экспериментах, выполненных в горной местности, обнаружена отрицательная корреляция этих параметров [Кречетов и Филиппов, 2000].

В экспериментах, выполненных на равнинах, получены также противоречивые результаты. В серии работ коллектива В.М. Шефтеля [Шефтель и Чернышев, 1991; 1992а; Шефтель и др., 1992б] было показано увеличение напряженности поля относительно фоновому уровню за пять–шесть часов до начала понижения ГКЛ. И эта фаза положительного возмущения поля продолжалась до момента максимальной глубины Форбуш-эффекта, а затем наступала более продолжительная отрицательная фаза возмущения поля. Опережение положительной фазы относительно начала Форбуш-эффекта авторы связали с действием солнечных протонов, а сам же эффект положительной фазы возмущения поля в стадии углубления — с воздействием на атмосферу жесткой мюонной компоненты ГКЛ, которая достигает уровня моря и определяет их вклад в проводимость атмосферы в месте регистрации электрического поля.

Подобный результат получен в работе [Marcz, 1997]: в день максимальной глубины Форбуш-эффекта во время сильных геомагнитных бурь наблюдалась положительная фаза возмущения напряженности электрического поля ~2%. И далее наступала продолжительная отрицательная фаза с постепенным восстановлением напряженности электрического поля в течение десяти дней. Причина эффекта, по мнению автора, — это изменение проводимости ГЭЦ под действием ГКЛ. Модельные расчеты отклика электрического поля и плотности тока проводимости в ГЭЦ при изменении профиля проводимости во время Форбуш-эффекта при постоянном токе ГГТ, выполненные в работе [Makino and Ogawa, 1984], показали отрицательную корреляцию между этими параметрами и интенсивностью ГКЛ.

Во время сильных геомагнитных бурь, включающих бурю 30 октября 2003 г., [Никифорова и

др., 2005; Клейменова и др., 2008] на ст. “Свидер” были зарегистрированы отрицательные бухты градиента потенциала электрического поля. Совпадение по времени их длительностей с длительностью всплесков риометрического поглощения в субавроральной зоне позволило авторам предположить, что “причиной появления отрицательных значений градиента потенциала электрического поля может быть возрастание проводимости верхней атмосферы, вызванное вторжением энергичных электронов в субавроральные широты” [Никифорова и др., 2005].

А на ст. “Борок” в главную фазу бури 28–31 марта 2000 г. наблюдалась положительная бухта напряженности электрического поля. В качестве механизма эффекта автор предполагает “проникновение полей магнитосферно-ионосферного источника в нижнюю атмосферу средних широт” [Анисимов, 2007].

При изучении связи напряженности электрического поля с Форбуш-эффектом ГКЛ в obs. “Паратунка” было обнаружено понижение напряженности электрического поля практически одновременно с понижением потока ГКЛ [Кузнецов и Чернева, 2008]. Максимальная величина отрицательной фазы возмущения электрического поля была ~5–10% с последующим восстановлением поля в течение 5–10 дней. В обсерватории измерялась также электропроводность положительных и отрицательных легких ионов в приземной атмосфере. Оказалось, что одновременно с эффектом в электрическом поле уменьшалась электропроводность отрицательных ионов. Это позволило авторам предположить следующий механизм наблюдаемых явлений: “Так как величина поля E_z определяется поверхностной плотностью отрицательных зарядов на поверхности Земли, то, естественно, если суммарная плотность зарядов Земли приземного слоя атмосферы понижается, то уменьшается величина E_z ” [Кузнецов и Чернева, 2008].

Приведенные выше результаты получены в различных пунктах преимущественно в условиях так называемой “хорошей погоды” [Reiter, 1992; РД 52.04.168 ..., 2002].

Вместе с тем в литературе представлена другая группа работ, посвященная исследованию связи атмосферных величин (температура, давление, ветер) с геомагнитной активностью и, в частности, с геомагнитными бурями. На второй день после начала бури были обнаружены суточные перепады атмосферного давления, величина и знак которых оказались зависимыми от региона и времени года [Мустель и др., 1977; 1979; Чертопруд и др., 1979; Пудовкин и Бабушкина, 1990]. На больших временных масштабах связь вариаций температуры и давления атмосферы с корпускулярными потоками от Солнца экспериментально

была обнаружена также в работе [Vucha, 1980]. В обзорах [Laštovička, 1996; Авдюшин и Данилов, 2000] приведены дополнительные данные об эффектах геомагнитных бурь в вариациях атмосферных величин, в частности, в вариациях индекса площади завихренности в тропосфере на уровне 500 гПа ($h \sim 5$ км). Этот индекс по существу характеризует поведение волн планетарного масштаба на этих высотах. В обзорах приведены также возможные механизмы влияния геомагнитных бурь на тропосферу: это динамический механизм, связанный с усилением акустико-гравитационных атмосферных волн и волн планетарного масштаба; это электрический механизм, связанный с глобальной электрической цепью и проникновением КЛ в атмосферу; это оптический механизм, связанный с изменением прозрачности атмосферы и химического состава в стратосфере под действием коротковолнового излучения Солнца и ГКЛ. Но в более позднем и расширенном обзоре [Danilov and Laštovička, 2001] авторы отдали предпочтение единственно возможному механизму влияния геомагнитных бурь на тропосферные процессы через изменение параметров глобальной электрической цепи под действием КЛ.

В отличие от предшествующих работ, для исследования эффектов геомагнитных бурь (ноябрь 2004 г.) в электрическом поле в приземной атмосфере на Камчатке (обс. “Паратунка”, $\varphi = 52.9^\circ$ N, $\lambda = 158.25^\circ$ E) нами использован более широкий набор различных геофизических и метеорологических величин, наблюдаемых одновременно. Выбор этих бурь обусловлен экстремальными событиями на Солнце, проявление которых детально рассмотрено в поведении многих геофизических процессов в магнитосфере и ионосфере Земли [Ермолаев и др., 2005]. Однако до настоящего времени как в отечественной, так и в зарубежной литературе, насколько нам известно, отсутствует информация об эффектах этих солнечных событий в вариациях напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере, наблюдаемых одновременно. В настоящей работе восстанавливается этот пробел. Ранее авторами рассмотрены эффекты более слабой геомагнитной активности в вариациях только напряженности электрического поля [Михайлова и др., 2009].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Реакцию электрического поля в приземной атмосфере на мощную геомагнитную бурю целесообразно рассматривать методом наложенных эпох в комплексе с процессами, происходящими на Солнце и у земной поверхности. В этой связи на рис. 1 приведены результаты наблюдений раз-

личных геофизических и метеорологических явлений в период с 4 по 15 ноября 2004 г.

Кривые 1 – напряженность квазистатического электрического поля (E_z – компонента), измеренная прибором “Поле-2” с точностью 0.3 В/м и с дискретностью по времени 1 мин, а также значения Dst – индекса (нТл), определенные с дискретностью по времени 1 ч.

Кривые 2–5 – соответственно, давление (P , гПа); температура (T° C); влажность (%) атмосферы и скорость ветра (V , м/с), измеренные с дискретностью по времени 10 мин в обс. “Паратунка”. (В период с 9 по 12 ноября величина скорости превысила динамический диапазон прибора). В работе дополнительно использованы данные наблюдений состояния облачности и осадков на местной метеорологической станции. К сожалению, в этот период отсутствовали результаты актинометрических измерений и электропроводности положительных и отрицательных легких ионов в приземной атмосфере.

Кривая 6 – горизонтальная компонента геомагнитного поля (HP), измеренная в обс. “Паратунка” феррозондовым магнитометром FRG-601G с точностью 0.01 нТл и с дискретностью по времени 1 мин.

Кривая 7 – последовательность солнечных вспышек, измеренная на спутнике GOES –12 [<http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/>].

Кривая 8 – трехчасовые значения Kp -индекса.

Кривая 9 – поток галактических космических лучей (N – число частиц/мин), измеренный нейтронным монитором с дискретностью по времени 1 мин в обс. “Стекольный” ИКИР ДВО РАН.

В дополнение к этому рисунку в таблице приведена более детально хронологическая последовательность этих событий, подробно описанная в статье [Ермолаев и др., 2005]. Как видно на рис. 1 и в таблице, в период 4–5 ноября солнечная (рентгеновское излучение балла M , слабое оптическое излучение интенсивностью F и SF) и геомагнитная ($Kp < 3$) активности были относительно спокойными, а метеорологические условия соответствовали условиям “хорошей погоды”. Но в начале 6 ноября на Солнце произошли три мощные вспышки, сопровождаемые тремя всплесками рентгеновского излучения баллов $M9.3/2N$ (00:11 UT); $M5.9$ (00:44 UT); $M3.6$ (01:40 UT) и аномальной оптической вспышкой балла $2N$. Вспышки сопровождалась соответственно выбросами корональной массы (ВКМ) в 01:31, 02:06 и 02:42 UT. В результате на Земле наблюдалась сильная геомагнитная буря (данные Dst -вариаций) с внезапным началом 7 ноября в 02:57, 10:52 и 18:27 UT, которая достигла максимума интенсивности ($Dst = -373$ нТл) 8 ноября в 07:00 UT. Длительность главной фазы этой бури составляла 13.5 ч. Вслед за ней на фазе восстановления 9 и

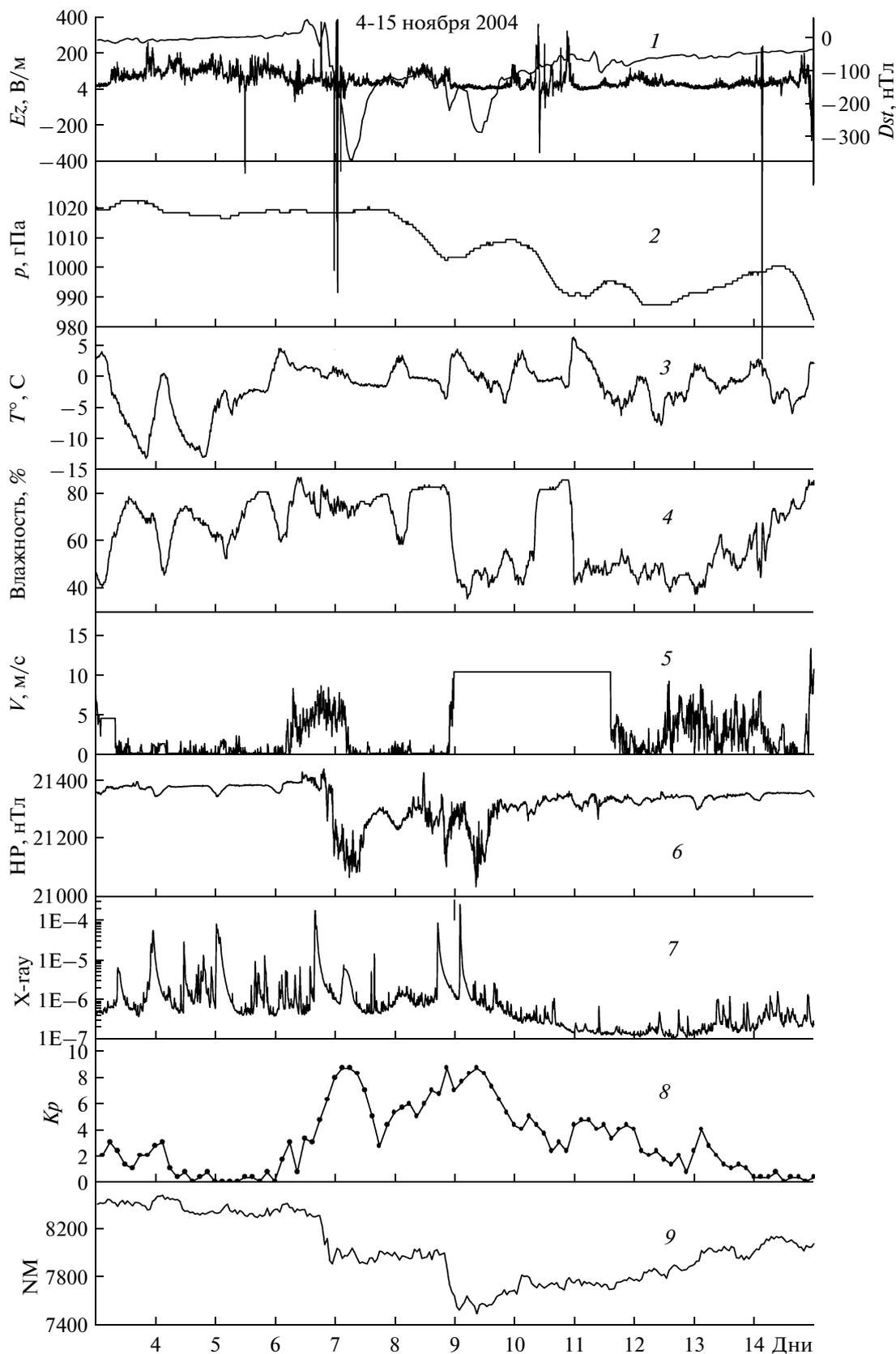


Рис. 1. Суточные вариации напряженности электрического поля, метеорологических, геофизических и солнечных величин в период 4–15 ноября 2004 г.

Вспышечные события в АО 10696 в период 04–15 ноября 2004 г. и их проявления в околоземном пространстве [Ермолаев и др., 2005, данные из INTERNET: *Dst* – (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>); *Kp* – (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/kp-cgi>)]

Дата	Вспышка		<i>S</i> ; UT	<i>Dst</i> , нТл	<i>Kp</i>	СКЛ; <i>E</i> , МэВ; <i>P</i> , см ⁻² с ⁻¹ ср ⁻¹	ГКЛ, %; <i>Rc</i> = 10 ГВ	Главная фаза бури
	Время, UT; Длит., мин	Балл						
04	08:45; >79	C6.3/SF		-18	2+	1–5 1		
04	21:42; >131	M2.5/SF		-10	3–	»		
04	22:53	M5.4/1N		-8	3–	»		
05	11:23; >10	M4.0/1F		-8	1–	»		
05	19:10	M1.2/SF		-6	1–	»		
06	00:11; 157	M9.3/2N		-3	0	1–5 10		
06	00:44	M5.9		-3	0	»		
06	01:40–02:08	M1.4		-1	0	»		
07	15:42–16:15	X2.0/2B	02:57	1	2	10 100	0.6	
07	>33		10:52	20	3+	»	0.4	
07			18:27	-29	6+	»		18:30; 07; –
08	07			-373	8+	14–26 1000	7.3	07:00; 08;
08	15:43–15:52	M2.3/1N		-151	3–	»		τ = 12.5 ч
09	17:00 90	M8.9/2N	09:30	-110	6	»		
10	02:00 76	X2.5/3B		-146	8–	–	8.1	02:00–
10	10:00			-289	8+	–	»	10:00; τ = 8 ч

10 ноября на Солнце произошли еще две мощные вспышки, сопровождаемые рентгеновским излучением баллов *M8.9/2N* (16:59 UT) и *X2.5/3B* (01:59 UT) и усилением излучения в оптическом диапазоне до *3B*. Внезапное начало бури отмечено 9 ноября в 09:30 UT. Она достигла максимума (*Dst* = -289 нТл) 10 ноября в 10:00 UT. Длительность главной фазы этой бури составила 8 ч. Одновременно с этими бурями наблюдались два сильных понижения ГКЛ.

По данным спутника GOES – 12 [Ермолаев и др. 2005, рис.16] потоки протонов в северной полярной шапке с энергией *E* = 1–5 МэВ в период 4–5 ноября составляли величину *N* ~ 1 /см²с ср. С ростом солнечной активности 6 ноября потоки протонов в этой полосе энергии возросли приблизительно в десять раз, 7 ноября – в сто раз, а 8 и 9 ноября – в тысячу раз. Максимальные потоки

энергии протонов наблюдались 8 ноября в диапазоне 14–26 МэВ.

Рассмотрим детально процессы, происходящие в приземной атмосфере в obs. “Паратунка” в этот период наблюдений. 4–5 ноября при слабой геомагнитной активности (*Kp* ≤ 3) солнечная активность в оптической области спектра была слабой (SF). В этих условиях суточный ход температуры атмосферы (кривая 3, рис. 1) изменялся регулярным образом, т.е. максимум температуры *T* = +4°C приходился в местный полдень (01:30 UT) и минимум *T* = -13°C – перед восходом Солнца. Соответственно в противофазе с температурой влажность воздуха составляла величины ~40 и ~75%. В отсутствие облачности и осадков (данные местной метеорологической службы) давление атмосферы изменялось незначительно, а скорость ветра была менее 2 м/с, т.е. выполнялись условия так называемой “хорошей погоды”. В

этих условиях напряженность электрического поля, показанная в увеличенном масштабе на рис. 2, имела характерный суточный ход с типичным возрастанием на восходе и заходе Солнца [Смирнов и др., 2012]. Далее в $t = 01:00$ UT 6 ноября произошла солнечная вспышка, в оптической области спектра которой яркость усилилась до $2N$. Одновременно произошло резкое искажение суточного хода температуры и влажности атмосферы: в полдень температура возросла от 0 до $+4^\circ\text{C}$, а ночью – от минус 13 до минус $(5-2)^\circ\text{C}$. При отсутствии ветра появилась небольшая облачность с прояснениями, которая исказила суточный ход напряженности поля (рис. 2). 7 ноября в $t \sim 16:00$ UT произошла следующая мощная вспышка ($X2.0/2B$), которая привела к дальнейшему повышению температуры в полдень до $+5^\circ\text{C}$ и росту влажности до 85%, а также к усилению ветра до ~ 7 м/с. Такие резкие изменения атмосферных процессов в нижнем слое атмосферы, как известно, могут сопровождаться усилением турбулентных и конвективных потоков воздуха и приводить к образованию сплошной облачности и осадков. Действительно, по данным местной метеорологической службы, в период 7–10 ноября наблюдалась сплошная облачность с прояснениями, а в период 8–9 ноября даже выпал снег. Более того, в таких метеорологических условиях возможно образование грозовых процессов. Действительно, как видно на рис. 1 и рис. 2, в полдень 8 ноября в вариациях напряженности электрического поля наблюдались большой величины (± 800 В/м) знакопеременные колебания, характерные для грозовых процессов [Михайлова и др., 2010]. Это грозовое явление совпало по времени с главной фазой геомагнитной бури 8 ноября (рис. 1, кривая 1), а ее начало – с началом Форбуш-эффекта ГКЛ (рис. 1, кривая 9).

Во время геомагнитной бури 10 ноября при относительно высокой температуре воздуха, но низкой влажности подобное явление не наблюдалось. Однако 11 ноября при высокой температуре воздуха влажность его возросла до 90%, что привело также к зарождению грозовых процессов в атмосфере и появлению сильных знакопеременных вариаций напряженности электрического поля (рис. 2).

Кроме того, на вторые сутки после начала геомагнитных бурь (рис. 1, кривая 2) наблюдался отрицательный перепад суточного давления ΔP порядка 20 гПа.

Для сравнения наблюдаемых вариаций напряженности электрического поля с результатами других исследований на рис. 3 приведены кривые исходных значений напряженности поля с дискретностью 1 мин (*а*) и усредненных значений за 1 ч (*б*). Начиная с 7 ноября (начало первого Форбуш-эффекта) на графике (*б*) наблюдаются отрицательные возмущения электрического поля с

колебаниями $\delta E \sim 90\%$ относительного среднего уровня в условиях “хорошей погоды” 4–5 ноября. С дальнейшим падением интенсивности потока ГКЛ знак возмущения сохраняется вплоть до 15 ноября. В периоды главных фаз геомагнитных бурь, совпадающих с резким понижением интенсивности ГКЛ, вариации отрицательных возмущений электрического поля ведут себя по-разному: во время бури 8 ноября в результате появления в атмосфере процессов грозового характера отрицательное возмущение по величине заметно уменьшается, а во время бури 10 ноября несколько возрастает.

3. ВАРИАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В последовательности событий 4–15 ноября в вариациях напряженности электрического поля и метеорологических величин выделяются явления с индивидуальными особенностями: это дни “хорошей погоды” (4–5 ноября); дни с аномальным суточным ходом температуры и влажности атмосферы (6–7 ноября); период главной фазы бури 8 ноября с наложенными грозовыми процессами в атмосфере (12:00 UT 7 ноября – 12:00 UT 8 ноября); период бури 10 ноября; период развития грозовых процессов в атмосфере (11 ноября).

Представляло интерес исследовать волновые процессы в приземной атмосфере в эти периоды. Для этой цели выполнен спектральный анализ суточных вариаций напряженности электрического поля по следующей схеме. Для оценки спектральной плотности мощности (для краткости, спектров мощности) в полосе периодов тепловых приливных волн с $T = 4-24$ ч (ТПВ) использован метод периодограмм с прямоугольным временным “окном” длительностью $t = 24$ ч. Для выделения компонент в полосе периодов внутренних гравитационных волн с $T = 5$ мин–3 ч (ВГВ) для предварительно отфильтрованных данных использован метод модифицированных периодограмм (Welch, 1967) со следующими параметрами: длительность сегмента $t_i = 8$ ч с перекрытием сегментов в 4 ч, так что суммарное число сегментов на интервале 24 ч равно пяти. Для оценки спектра каждого сегмента использовано косинусное временное “окно”. Для выделения компонент спектров мощности в полосе периодов волн планетарного масштаба с $T > 24$ ч (ВПМ) использован метод периодограмм с прямоугольным временным “окном” длительностью $t_i = 2$ сут, смещающимся на одни сутки вдоль временного ряда данных в период 4–15 ноября. Выбор такой длительности “окна” обусловлен двумя моментами: во-первых, условие “хорошей погоды” сохранилось 4 и 5 ноября; во-вторых, как видно на рис. 1 (кривая 8), продолжительность периодов высокой гео-

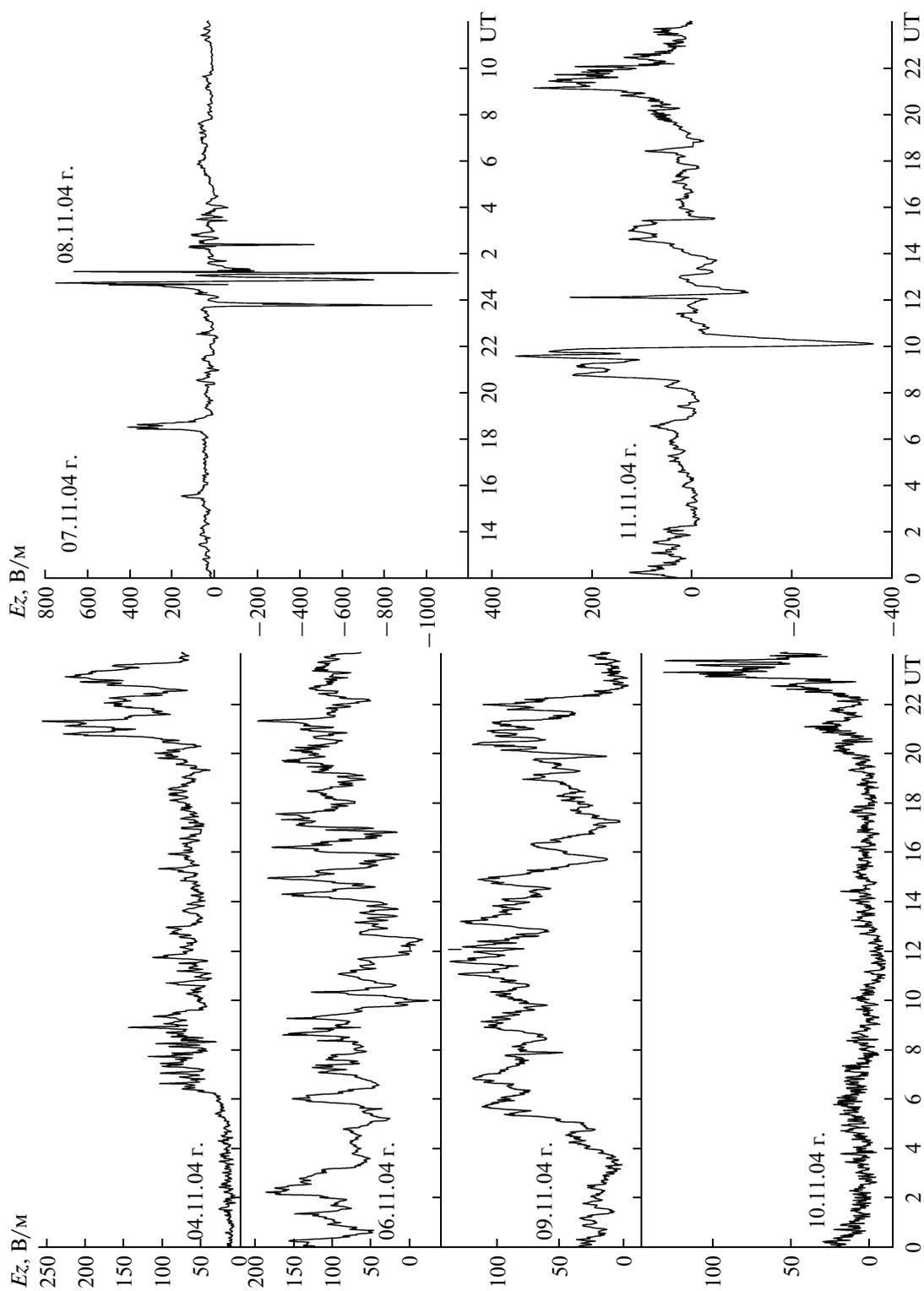


Рис. 2. Суточные вариации напряженности электрического поля в выделенные интервалы наблюдений.

магнитной активности составляла приблизительно в двое суток.

Результирующие спектры мощности E_z — компоненты поля для кривых, приведенных на рис. 2, показаны на рис. 4. Они построены отдельно в полосе ТПВ (4–24 ч) $SE1$, ВГВ (0.5–3 ч и 6–30 мин) $SE2$ и ВПМ (4–48 ч) SE . Первая цифра на кривых ВПМ соответствует первой дате временного “окна”. Как видно на рисунке, 4 ноября в спектре ТПВ выделяется основная компонента с $T \sim 24$ ч и убывающие по интенсивности гармоники с $T \sim 12, 8$ и 4 ч, а в спектре ВГВ — компоненты с $T \sim 1.5$ и 2.5 ч., интенсивность которых почти на два порядка по величине ниже компонент ТПВ. В полосе периодов ВПМ преобладает компонента с периодом $T \sim 48$ ч. Подобный характер спектров мощности электрического поля в условиях “хорошей погоды” наблюдался на Камчатке, например, в сентябре 1999 г. [Михайлова и др., 2009]. 6 ноября в результате мощной солнечной вспышки, сопровождаемой аномалией в суточных вариациях температуры и влажности атмосферы, произошли такие изменения спектров мощности: нарушилась периодичность компонент с $T = 8$ и 12 ч, а интенсивность компоненты с $T \sim 24$ ч уменьшилась почти в два раза, в то время как почти на порядок по величине возросла интенсивность спектра в полосе ВГВ. Усложнился также спектр ВПМ за счет усиления компоненты с $T = 24$ ч. В период с 12:00 UT 7 ноября по 12:00 UT 8 ноября, включающий в себя главную фазу бури 8 ноября и сильные гроззовые процессы, в полосе ТПВ компоненты с $T \sim 8, 12$ и 24 ч слились в один широкий максимум с дальнейшим их ослаблением по сравнению с условиями “хорошей погоды”. Усилились практически на два порядка по величине компоненты спектра в полосе ВГВ. В полосе ВПМ преобладает компонента с периодом $T \sim 12$ ч и сильно подавлена компонента с $T \sim 48$ ч. В паузе между двумя бурями 9 ноября характер спектров и по форме и по интенсивности максимумов близко совпадает со спектрами в условиях “хорошей погоды”. 10 ноября во время второй бури характер спектров в полосе ТПВ и ВГВ по форме близко совпадает со спектрами 9 ноября, но по интенсивности максимумов на порядок по величине ниже. В спектре ВПМ преобладает компонента с периодом $T = 48$ ч. И, наконец, 11 ноября в день с гроззовой активностью, но более слабой, чем 8 ноября, в спектре ТПВ выделен полный спектр компонент практически одинаковой интенсивности и совпадающей по величине со спектрами 4 ноября. Но при этом в полосе ВГВ интенсивность спектров возросла на порядок по величине по сравнению со спектрами 4 ноября. Подобный характер спектров наблюдался также при грозах на Камчатке в сентябре 1999 г. [Михайлова и др., 2010]. Сравнивая спектры мощности в полосе периодов ТПВ и ВГВ 7–8 ноября и 10–11 ноября,

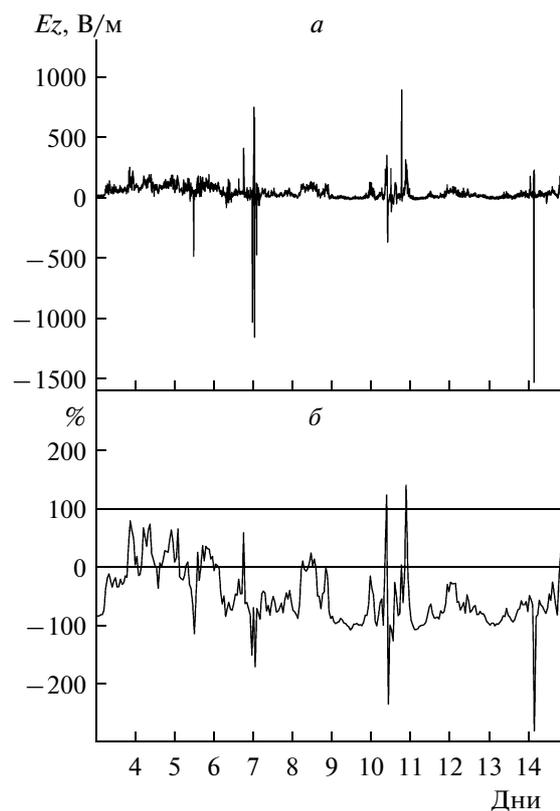


Рис. 3. Наблюдаемые вариации напряженности электрического поля, измеренные с дискретностью по времени 1 мин (а) и усредненные значения за 1 ч (б).

можно сделать вывод, что основной вклад в спектр электрического поля во время главной фазы бури 8 ноября внесли гроззовые процессы, наблюдаемые одновременно.

Для анализа взаимосвязи различных процессов в приземной атмосфере с солнечными и геомагнитными явлениями на рис. 5 приведена последовательность спектров мощности всех рассмотренных нами величин в полосе периодов 4–48 ч. Обозначения спектральных кривых соответствуют обозначениям на рис. 1. Для дальнейшего анализа спектров мощности исключим из рассмотрения дни с гроззовой активностью и будем рассматривать только периоды 4–5 ноября (дни с “хорошей погодой”) и 9–10 ноября с бурей 10 ноября. Как видно на рисунке, 4–5 ноября в спектре мощности электрического поля выделяются компоненты с периодами $T \leq 8, 12, 48$ ч с преобладающей интенсивностью на $T \sim 48$ ч. При этом во всех спектрах (SP, SN, SD), кроме спектров температуры (ST), влажности (SV) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SH), также преобладают компоненты с $T \sim 48$ ч. В период 9–10 ноября в спектре мощности электрического поля преобладает только компонента с $T \sim 48$ ч, а в спектрах влажности, давления и ГКЛ интенсивность этой компо-

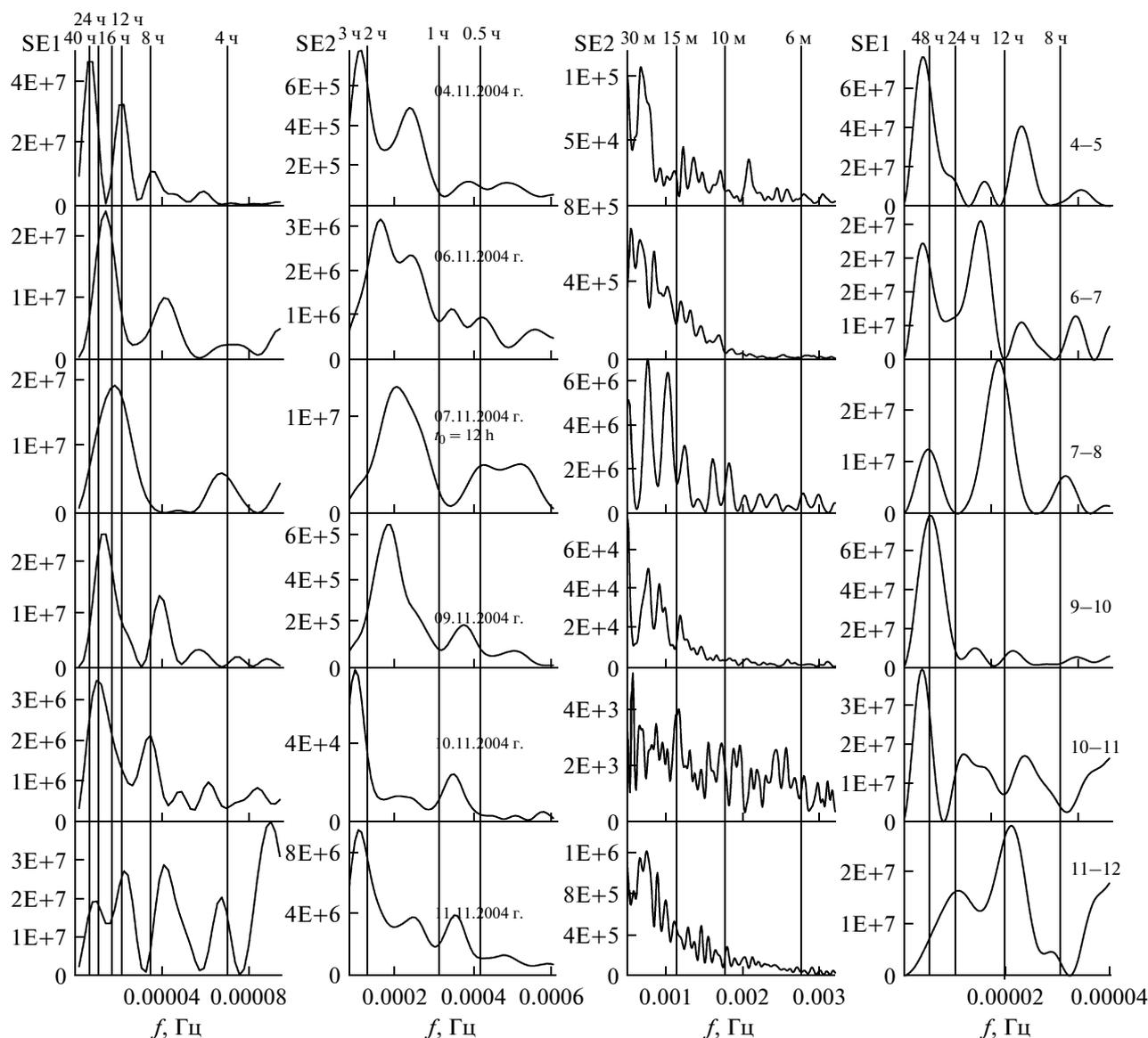


Рис. 4. Вариации спектральной плотности мощности тепловых приливных волн ($T \sim 4\text{--}24$ ч), внутренних гравитационных волн ($T \sim 30$ мин—3 ч; 5—30 мин) и волн планетарного масштаба ($T \sim 4\text{--}48$ ч) в суточных вариациях напряженности электрического поля, приведенных на рис. 2. Вертикальными сплошными линиями выделены периоды спектральных компонент.

ненты возросла почти на два порядка по величине по сравнению с условиями “хорошей погоды”. Начиная с 9 ноября на порядок по величине уменьшилась максимальная интенсивность компоненты спектра температуры (ST) на периоде $T \sim 48$ ч. Подобный характер спектра мощности электрического поля в этой полосе периодов наблюдался на Камчатке во время геомагнитной бури 22 сентября 1999 г. [Михайлова и др., 2009].

Сильное различие по составу компонент и их интенсивности в спектрах мощности электрического поля (SE) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SH) как в условиях “хорошей погоды”, так и в геомагнитную бурю 10 ноября свиде-

тельствует об отсутствии причинно-следственных связей между этими величинами. Влияние ГКЛ на электрическое поле в приземной атмосфере проявляется только на периодах $T \sim 48$ ч, когда интенсивность этой компоненты возрастает на два порядка по величине и проявляется в усилении интенсивности этой компоненты на два порядка по величине по сравнению с условиями “хорошей погоды”. В отсутствие грозových явлений и при слабой геомагнитной активности, но при высокой солнечной активности в оптической области спектра (кривые 6—7) наибольшее влияние на электрическое поле оказывают вариации влажности воздуха.

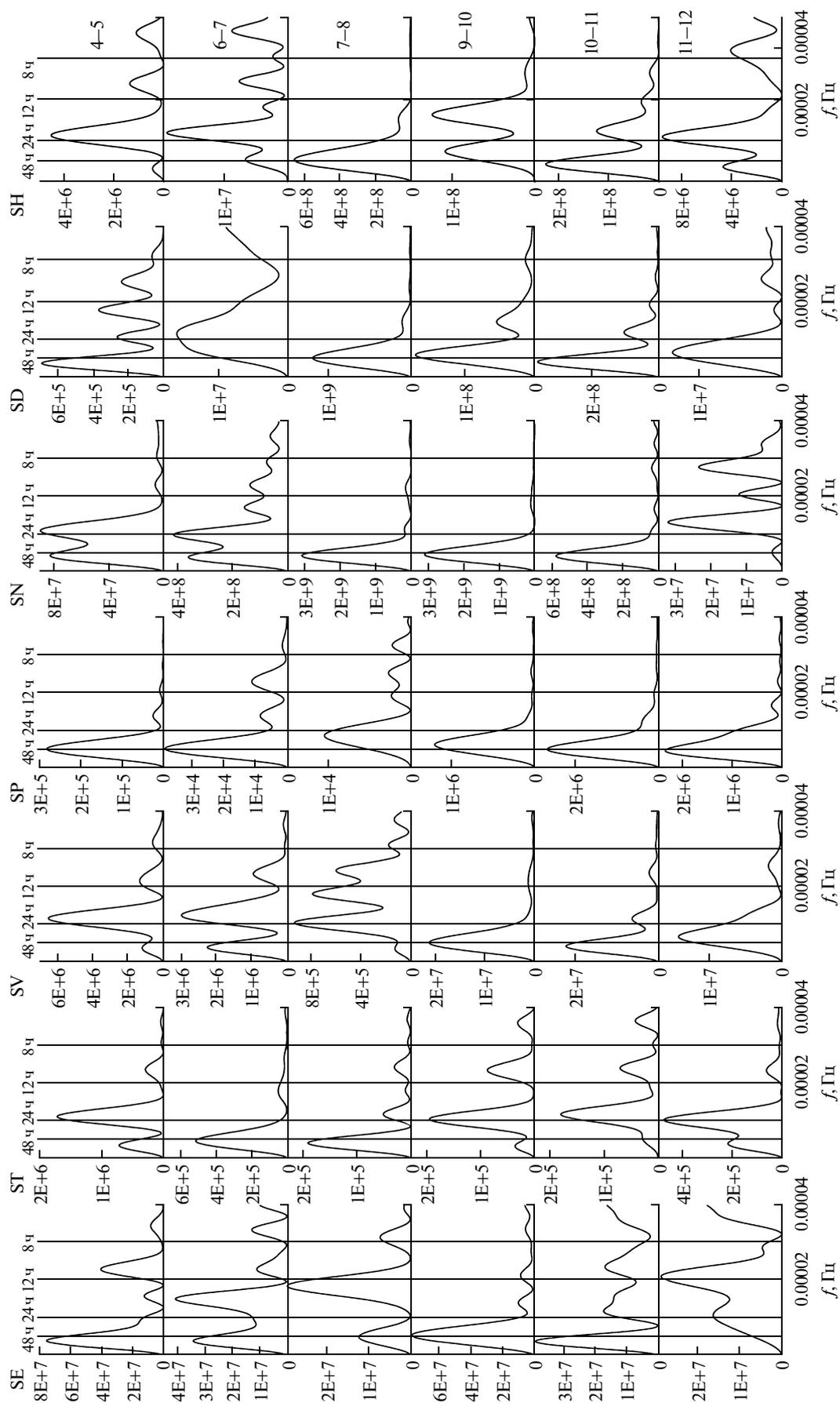


Рис. 5. Последовательность кривых спектральной плотности мощности электрического поля и величин, приведенных на рис. 1, для событий в дни, выделенные на рис. 2.

ха, усиливая компоненту с периодом $T \sim 24$ ч в спектре поля.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно на рис. 1, эффекты геомагнитных бурь 8 и 10 ноября в вариациях напряженности электрического поля в приземной атмосфере развивались на фоне сильно изменившихся метеорологических величин (кривые 3, 4, 5), т.е. в отсутствие условий “хорошей погоды”. Под действием серии мощных солнечных вспышек (кривая 7) произошедших в период 6–10 ноября, аномальные изменения суточного хода температуры и влажности привели к образованию облачности и осадков в виде снега, которые, в свою очередь, привели к понижению напряженности электрического поля и сильным вариациям ее величины (рис. 3). На этом фоне 8 ноября дополнительно произошли грозвые процессы, также искавшие суточный ход напряженности поля (рис. 2) и не позволившие выделить в них эффект ГКЛ. Но это удалось сделать 10 ноября при относительно слабом влиянии метеорологических величин. Как во временных вариациях напряженности поля (рис. 2), так и в вариациях спектра мощности 10 ноября (рис. 4 и 5) наблюдалось значительное ослабление напряженности поля по сравнению с предшествующим днем с одновременным усилением волн планетарного масштаба с $T \sim 48$ ч. Этот результат совпадает с результатами других исследований, в которых показано ослабление напряженности электрического поля в приземной атмосфере во время Форбуш-эффекта и усиление волн планетарного масштаба (см. Введение).

Для объяснения наблюдаемых эффектов во временных вариациях напряженности электрического поля рассмотрим действие глобальной электрической цепи в рамках модели сферического конденсатора. Из основных электродинамических уравнений, описывающих ГЭЦ, следует общее выражение для плотности тока в виде [Атмосфера, 1991]:

$$J = \lambda E + \rho V + D_{\tau} \nabla \rho + \sum J_s,$$

где λ – проводимость; E – напряженность электрического поля; ρ – плотность заряда; V – скорость движения среды; D_{τ} – коэффициент турбулентной диффузии; $\sum J_s$ – суммарная плотность токов S источников. Первое слагаемое – это ток проводимости в атмосфере, обусловленный глобальным грозвым генератором. Второе и третье слагаемые учитывают локальные токи в обменном слое атмосферы, вызванные конвективным генератором. А последнее слагаемое включает в себя возможные источники как локального, так и глобального масштаба. К первым из них можно отнести облачность, осадки, локальные молние-

вые разряды, подпочвенные радиоактивные газы (в ноябре из-за низких температур воздуха радиоактивные источники практически не влияют на проводимость в обменном слое). Дополнительным глобальным источником тока являются космические лучи. В средних широтах на высотах порядка 15–20 км, как показано в работе [Стожков и др., 2001], наблюдается линейная связь между плотностью тока и потоком КЛ. При спокойных геомагнитных условиях коэффициент корреляции между годовыми значениями этих параметров составляет величину 0.77 ± 0.10 . На высотах выше 35 км в высокоширотной атмосфере основной вклад в токи ГЭЦ вносят СКЛ. В рассматриваемый период, как следует из работы [Ермолаев и др., 2005, рис. 16], 9 ноября потоки солнечных протонов в диапазоне энергии 1–5 МэВ возросли на три порядка по величине по сравнению с потоками 6 ноября. И граница их проникновения в атмосферу опустилась до инвариантных широт ~ 55 – 60° [Ермолаев и др., 2005, рис. 30]. Вторжение солнечных протонов на высоты стратосферы могло вызвать рост ионизации атмосферы и усиление токов в ГЭЦ. При глубоком понижении потоков ГКЛ во время бури 10 ноября имел место обратный эффект (рис. 3). Образовавшийся аномально мощный грозвой процесс во время главной фазы магнитной бури 8 ноября подавил влияние Форбуш-эффекта как в суточном ходе (рис. 2), так и в спектрах мощности E_z -компоненты поля (рис. 4 и 5). На фазе восстановления потоков ГКЛ 10–15 ноября линейная связь напряженности электрического поля с потоками отсутствовала из-за сильного влияния метеорологических процессов на электрическое поле. В спектральных характеристиках влияние Форбуш-эффекта на электрическое поле проявляется на периоде волн планетарного масштаба, когда интенсивность компоненты с $T \sim 48$ ч в спектрах космических лучей и электрического поля возрастает на два порядка по величине по сравнению с условиями “хорошей погоды”.

Если временные и частотные вариации напряженности электрического поля в наблюдаемый период качественно можно объяснить влиянием потоков космических лучей (выход подпочвенных газов, насыщенных радоном, заметно сокращается при низких температурах воздуха), то изменение метеорологических величин в рассматриваемых условиях трудно объяснить даже качественно. В настоящее время в литературе предложено несколько возможных физических механизмов связи метеорологических величин с солнечной и геомагнитной активностями, краткий перечень и обсуждение которых приведены в обзорах [Tinsley, 2000; Danilov and Laštovička, 2001] (см. Введение). Подробное обсуждение и сравнение этих механизмов с полученными в работе экспериментальными результатами выходят за рамки данной ста-

ты. Отметим только, что для проверки, например, оптического механизма, предложенного в работе [Пудовкин, 1996], в обсерватории отсутствовали актинометрические измерения прямой солнечной радиации в оптическом диапазоне. Для проверки механизма влияния напряженности квазистатического электрического поля на облачность и соответственно на температурный режим в тропосфере, предложенного в работах [Tinsley, 2000; Молодых и др., 2007], необходимы одновременные измерения распределения объемного заряда по высоте и напряженности электрического поля.

Вместе с тем в рассматриваемый период были обнаружены следующие изменения метеорологических величин:

1. С момента начала активной фазы на Солнце 6 ноября появилась небольшая облачность с прояснениями как признак медленно восходящих потоков воздуха. По мере роста солнечной активности 7 ноября она переросла в сплошную облачность с зарождением конвективных облаков, породивших грозные явления 8 ноября (выпал снег). Эти процессы происходили непрерывно, сменяя облачность с прояснениями 9 ноября на сплошную конвективную облачность 11 ноября. Динамика развития облачности свидетельствует об усилении восходящих потоков теплого воздуха. Это, в свою очередь, указывает на поступление в атмосферу дополнительных притоков тепла.

2. При наличии сплошной облачности аномальное повышение температуры воздуха в ночное местное время от минус 13 до минус 2 градусов с менее значительным повышением днем — от нуля до плюс 5 градусов.

3. Усиление ветра от 1 до 8 м/с, вызванное усилением турбулентного обмена между земной поверхностью и атмосферой и связанное с ним усиление волн планетарного масштаба.

Эти факты по времени совпали с началом активной фазы на Солнце и развивались на фоне усиления солнечной активности. Это наводит на мысль, что они вызваны поступлением в нижнюю атмосферу дополнительного притока тепла в результате тепловой вспышки на Солнце, на которую указывает также усиление яркости излучения в линии $H\alpha$ от SF до $3B$ баллов. К сожалению, в литературе отсутствуют данные об усилении интенсивности излучения в инфракрасном диапазоне волн, которое должно возрасти, как и УФ-излучение, при тепловых вспышках [Fletcher et al., 2011].

Обнаруженный нами отрицательный суточный перепад давления ~ 20 гПа на второй день после обеих геомагнитных бурь согласуется с подобным эффектом, наблюдаемым в других работах (см. Введение), авторы которых связывают его с действием корпускулярных потоков от Солнца.

Экспериментальный факт резкого изменения температуры атмосферы в период 6–8 ноября при спокойных вариациях интенсивности ГКЛ, т.е. до момента появления Форбуш-эффекта, позволяет усомниться в их взаимосвязи. Этот вывод согласуется с результатами работы [Вольфендейл и др., 2009]. Более того, во время бури 10 ноября в спектре мощности температуры преобладает компонента с максимальной интенсивностью на периоде $T \sim 24$ ч, в то время как в спектре ГКЛ — компонента на $T \sim 48$ ч.

5. ВЫВОДЫ

Исследования вариаций напряженности и спектров мощности квазистатического электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в ноябре 2004 г. показали следующее:

1. Последовательность сильных солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в оптическом диапазоне ЭМИ Солнца, сопровождалась аномальным повышением температуры и влажности атмосферы, что привело к возбуждению аномально мощных грозных процессов во время геомагнитной бури 8 ноября.

2. Образование облачности и осадков с момента солнечной вспышки 6 ноября привело к понижению общего фоновому уровню электрического поля по сравнению с условиями “хорошей погоды”.

3. Обнаружено усиление напряженности и интенсивности спектров мощности электрического поля накануне геомагнитной бури 10 ноября с последующим ослаблением этих величин в день бури. Качественно этот эффект может быть связан с действием космических лучей на токи глобальной электрической цепи, которые способны изменить ионизацию атмосферы на различных участках этой цепи (солнечные протоны на высотах ~ 50 км, а ГКЛ на высотах ~ 15 – 20 км).

4. Показано, что во время Форбуш-эффекта наблюдается одновременное усиление интенсивности атмосферных волн планетарного масштаба ($T \sim 48$ ч) в спектрах мощности ГКЛ и электрического поля.

5. Показано, что в спокойных геомагнитных условиях наибольшее влияние на электрическое поле в приземной атмосфере оказывают вариации влажности атмосферы, усиливая компоненту в его спектре с периодом $T \sim 24$ ч.

6. Показано отсутствие причинно-следственных связей между вариациями напряженности электрического поля и горизонтальной компоненты геомагнитного поля как в условиях “хорошей погоды”, так и во время бури 10 ноября.

7. Обнаружен отрицательный суточный перепад атмосферного давления на второй день после обеих геомагнитных бурь, причина которого неясна.

8. Совпадение по времени начала активной фазы на Солнце с нарушением регулярных метеорологических процессов в нижней атмосфере позволило предположить, что эти эффекты обусловлены тепловыми вспышками в оптическом диапазоне волнового излучения Солнца.

В заключение авторы благодарят Л.И. Мирошниченко за полезное обсуждение эффектов космических лучей в глобальной электрической цепи, а также В.К. Михайлову за помощь в оформлении рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 5. С. 3–14. 2000.
- Анисимов С.В. Геофизические аспекты исследования глобальной электрической цепи // VI Российская конф. по атмосферному электричеству 1–7 октября 2007 г. Нижний Новгород. Сб. тр. Н. Новгород: ИПФАН. С. 7–10. 2007.
- 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.
- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат. С. 395. 1991.
- Вольфендейл А., Дялаи Д., Ерлыкин А.Д., Кудела Н., Слоан Г. О природе корреляции между интенсивностью космических лучей и облачностью // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 73. № 3. С. 408–411. 2009.
- Ермолаев Ю.И. и 48 соавторов. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 6. С. 723–763. 2005.
- Клеймёнова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 650–659. 2008.
- Кречетов А.А., Филиппов А.Х. Электрическое поле атмосферы и интенсивность космических лучей // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН. С. 30–32. 2000.
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В. Исследование Форбуш-понижения и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории “Паратунка” (Камчатка) // Вест. КРАУНЦ. Наука о Земле. Вып. 11. № 1. С. 89–97. 2008.
- Марксон Р. Атмосферное электричество и проблемы связи между солнечной активностью и погодой // Солнечно-земные связи, погода и климат / Ред. Б. Мак-Корман и Т. Селига. М.: Мир. С. 242–264. 1982.
- Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Спектры мощности тепловых приливных и планетарных волн в приземной атмосфере и в D-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 639–652. 2009.
- Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Смирнов С.Э. Эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 6. С. 843–852. 2010.
- Молодых С.И., Коваленко В.А., Жеребцов Г.А. Механизм влияния атмосферного электричества на характеристики тропосферы Земли // Сб. тр. VI Всероссийской конф. по атмосферному электричеству. 1–7 октября 2007 г. Н. Новгород: ИПФАН. С. 26–27. 2007.
- Мустель Э.Р., Чертопруд В.Е., Хведолиане В.А. Сравнение изменений поля приземного атмосферного давления в период высокой и низкой геомагнитной активности // Астрон. журн. Т. 54. Вып. 2. С. 682–697. 1977.
- Мустель Э.Р., Чертопруд В.Е., Мулюкова Н.Б. Связь между корпускулярной активностью Солнца и ростом неустойчивости нижней атмосферы // Астрон. журн. Т. 56. Вып. 4. С. 876–880. 1979.
- Никифорова Н.Н., Клеймёнова Н.Г., Козырева О.В., Кубацки М., Михновски С. Необычные вариации атмосферного электрического поля во время главной фазы сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. на Польской среднеширотной обсерватории Свидер // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 148–152. 2005.
- Пудовкин М.И., Бабушкина С.В. Эффекты солнечных вспышек в вариациях приземного давления // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 3. С. 469–473. 1990.
- Пудовкин М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоды // Сорский образов. журн. №10. С. 106–113. 1996.
- РД 52.04.168-2001. Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. С. 23. 2002.
- Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. I. Временные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 535–540. 2012.
- Стожков Ю.И., Ермаков В.И., Покревский П.Е. Космические лучи и атмосферные процессы // Изв. АН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 406–410. 2001.
- Чертопруд В.Е., Мустель Э.Р., Мулюкова Н.Б. О неустойчивости тропосферы, связанной с солнечной активностью // Астрон. журн. Т. 56. Вып. 1. С. 106–117. 1979.
- Шефтель В.М., Чернышов А.К. Эффекты солнечных вспышек в атмосферном электричестве высоких и средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 3. С. 500–505. 1991.
- Шефтель В.М., Чернышев А.К. Реакция атмосферного электричества на изолированную вспышку и на серию вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 1. С. 111–117. 1992а.
- Шефтель В.М., Бандилет О.М., Чернышев А.К. Эффекты планетарных магнитных бурь в атмосферном электричестве вблизи поверхности Земли //

- Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 1. С. 186–188. 1992б.
- *Bucha V.* Mechanism of the relations between the changes of the geomagnetic field, solar corpuscular radiation, atmospheric circulation // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 32. № 4. P. 217–264. 1980.
 - *Danilov A.D., Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Intern. J. Geomag. Aeronomy.* V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.
 - *Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al.* An observational overview of solar flares // *Space Sci. Rev.* V. 159. P. 19–106. 2011.
 - *Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 58. № 7. P. 831–843. 1996.
 - *Makino M., Ogawa T.* Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variations of conductivity profiles // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 46. № 5. P. 431–445. 1984.
 - *Markson R.* Modulation of the Earth's electric field by cosmic radiation // *Nature.* V. 291. P. 304–308. 1981.
 - *Marec F.* Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 59. № 9. P. 975–982. 1997.
 - *Reiter R.* Phenomena in atmospheric and environmental electricity. Amsterdam–London–New York–Tokyo: Elsevier. 541 p. 1992.
 - *Tinsley B.A.* Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere // *Space Sci. Rev.* V. 94. P. 231–258. 2000.
 - *Welch P.D.* The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short modified periodograms // *IEEE Trans. Audio and Electroacoustic.* V. AU-15. № 2. P. 70–75. 1967.