

УДК 550.385.550.37

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ В ОКТЯБРЕ 2003 г.

© 2014 г. С. Э. Смирнов¹, Г. А. Михайлова², О. В. Капустина²

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

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

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

Поступила в редакцию 28.02.2013 г.

После доработки 08.04.2013 г.

Исследованы суточные вариации электропроводности, напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере во время солнечных событий в период 21–31 октября 2003 г. Показано, что электропроводность и напряженность электрического поля проявляют сильную зависимость от температуры и влажности воздуха. Обнаружено увеличение электропроводности в течение двух дней накануне геомагнитной бури 29–30 октября в результате действия СКЛ и уменьшение ее во время Форбуш-понижения ГКЛ с соответствующим ростом напряженности электрического поля. Обнаружено аномальное повышение температуры и влажности воздуха в процессе развития солнечной активности, что привело к образованию облаков различных форм, включая кучево-дождевые, сопровождаемые грозовыми процессами и ливнями. Совпадение по времени нарушения регулярных метеорологических процессов с последовательностью солнечных вспышек и усилением излучения в полосе ближнего ультрафиолета, видимой и инфракрасной частях спектра, позволяет рассматривать их в качестве источника дополнительного притока энергии в нижнюю атмосферу.

DOI: 10.7868/S0016794014020187

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния солнечной и геомагнитной активностей на квазистатическое электрическое поле и метеорологические величины в приземной атмосфере в высоких и на средних широтах проводятся сравнительно давно. Этому вопросу посвящена довольно обширная литература (см., например, [Парамонов, 1969; Roble, 1985]). Анализ работ, выполненных в последнее время, приведен в статье [Смирнов и др., 2013], в которой показана противоречивость полученных результатов и предлагаемых механизмов наблюдаемых эффектов. Выбор нами геомагнитной бури в октябре 2003 г. обусловлен экстремальными событиями на Солнце, проявление которых в поведении многих геофизических процессов в магнитосфере и ионосфере Земли рассмотрено в работах [Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004]. В вариациях квазистатического электрического поля в приземной атмосфере эффект этой геомагнитной бури на средних широтах (ст. “Свидер”, геомагнитные координаты $\Phi' = 48^\circ$, $\Lambda' = 105^\circ$) ранее был рассмотрен в работе [Никифорова и др., 2005]. Во время главной фазы бури в условиях “хорошей погоды” были зарегистрированы отри-

цательные 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].

Ранее авторами настоящей статьи были рассмотрены эффекты слабой [Михайлова и др., 2009] и экстремальной [Смирнов и др., 2013] геомагнитных бурь в вариациях напряженности электрического поля, а также в вариациях метеорологических величин во время экстремальной бури в ноябре 2004 г.

Настоящая работа является продолжением исследований, выполняемых на Камчатке (обс. “Паратунка”, $\varphi = 52.9^\circ \text{ N}$; $\lambda = 158.25^\circ \text{ E}$) в этом направлении, и посвящена исследованию солнечных событий в октябре 2003 г. Здесь также использован широкий набор различных геофизических и метеорологических величин: напряженность квазистатического электрического поля;

температура, давление, влажность воздуха; скорость ветра; геомагнитные индексы; потоки космических лучей и X -лучей, наблюдаемых одновременно. Кроме того, в отличие от работы [Смирнов и др., 2013], дополнительно использованы одновременные записи электропроводности воздуха.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Реакцию электрических и метеорологических процессов 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 различных геофизических и метеорологических величин в период с 21 по 31 октября 2003 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 и 3 – электропроводности воздуха, обусловленные отдельно положительными (λ_+) и отрицательными (λ_-) ионами и измеренные прибором “Электропроводность-2” (в условных единицах).

Кривые 4–8 – соответственно, давление (P , гПа); температура (T , °C); влажность (%) воздуха; осадки и скорость ветра (V , м/с), измеренные с дискретностью по времени 10 мин в obs. “Паратунка” цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Выходные данные с них поступают в обсерваторию по радиоканалу на частоте 433 МГц. На кривую 4 нанесена дополнительно величина горизонтальной компоненты геомагнитного поля (H), измеренная в obs. “Паратунка” феррозондовым магнитометром FRG-601G с точностью 0.01 нТл и с дискретностью по времени 1 мин (правая ось ординат).

В работе использованы также данные наблюдений состояния облачности и осадков на местной метеорологической станции. К сожалению, в этот период отсутствовали результаты актинометрических измерений.

Кривая 7 – трехчасовые значения Kp -индекса.

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

Кривая 10 – последовательность солнечных вспышек, измеренная на спутнике GOES-12 [<http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/>].

В дополнение к этому рисунку в таблице приведена более детально хронологическая последовательность этих событий, подробно описанная в статье [Веселовский и др., 2004], а на рис. 2 показана последовательность нескольких наиболее интересных фрагментов записей электропроводности и напряженности поля в увеличенном масштабе в зависимости от универсального времени UT. (На долготе обсерватории местный полдень приходится в 1:45 UT, полночь – в 10:55 UT),

Рассмотрим детально процессы, происходящие в приземной атмосфере. Как видно на рис. 1 и в таблице, в период 21–22 октября солнечная (рентгеновское излучение балла $M 9.9$) и геомагнитная ($Kp < 3$) активности были относительно спокойными, а метеорологические условия при наличии высокослоистых облаков и в отсутствие осадков близко соответствовали условиям “хорошей погоды” [РД ..., 2002]. При этом 21 и 22 октября температура воздуха в полдень составляла +12°C (кривая 5 на рис. 1), а влажность – 45% (кривая 6), электропроводность – ~4000. В этот день, согласно данным местной метеорологической станции, наблюдалась сплошная облачность высокослоистых облаков при слабом ветре и отсутствии осадков, вариации электропроводности и напряженности электрического поля имеют регулярный суточный ход, соответствующий условиям “хорошей погоды” [Смирнов, 2013].

22 октября характер поведения электропроводности и напряженности поля в течение суток, в отличие от предыдущего дня с подобным суточным ходом температуры и влажности, несколько изменился: нарушился плавный ход уменьшения электропроводности в результате небольшого дождя (данные местной метеорологической станции), несущего, как известно [Имянитов и Чубарина, 1965], объемные заряды к земле. Кроме того, наличие сплошной облачности среднего яруса 10 баллов, по-видимому, привело к понижению среднесуточного уровня напряженности электрического поля и к ослаблению эффекта восхода Солнца. В эти два дня амплитуды суточных вариаций (как половины разности максимальных и минимальных величин) температуры составляли 7.5–8°C, а влажности – 22.5%.

23 октября на Солнце произошли две вспышки в 08:17 UT $X5.4/1B$ и в 19:50 UT $X1.1/1N$. В последующие два дня резко изменился температурный режим в атмосфере: суточная амплитуда температуры упала, соответственно, до 5 и 1°C за счет аномального повышения ее в ночное время, а влажности – соответственно, до 0.5 и 2.5% за счет повышения, наоборот, в дневное время. В этих условиях 25 октября появилась сплошная облачность нижнего яруса в 10 баллов без осадков, а 24 октября она сопровождалась умеренным в начале суток и позже обложным дождем. Эти метеоро-

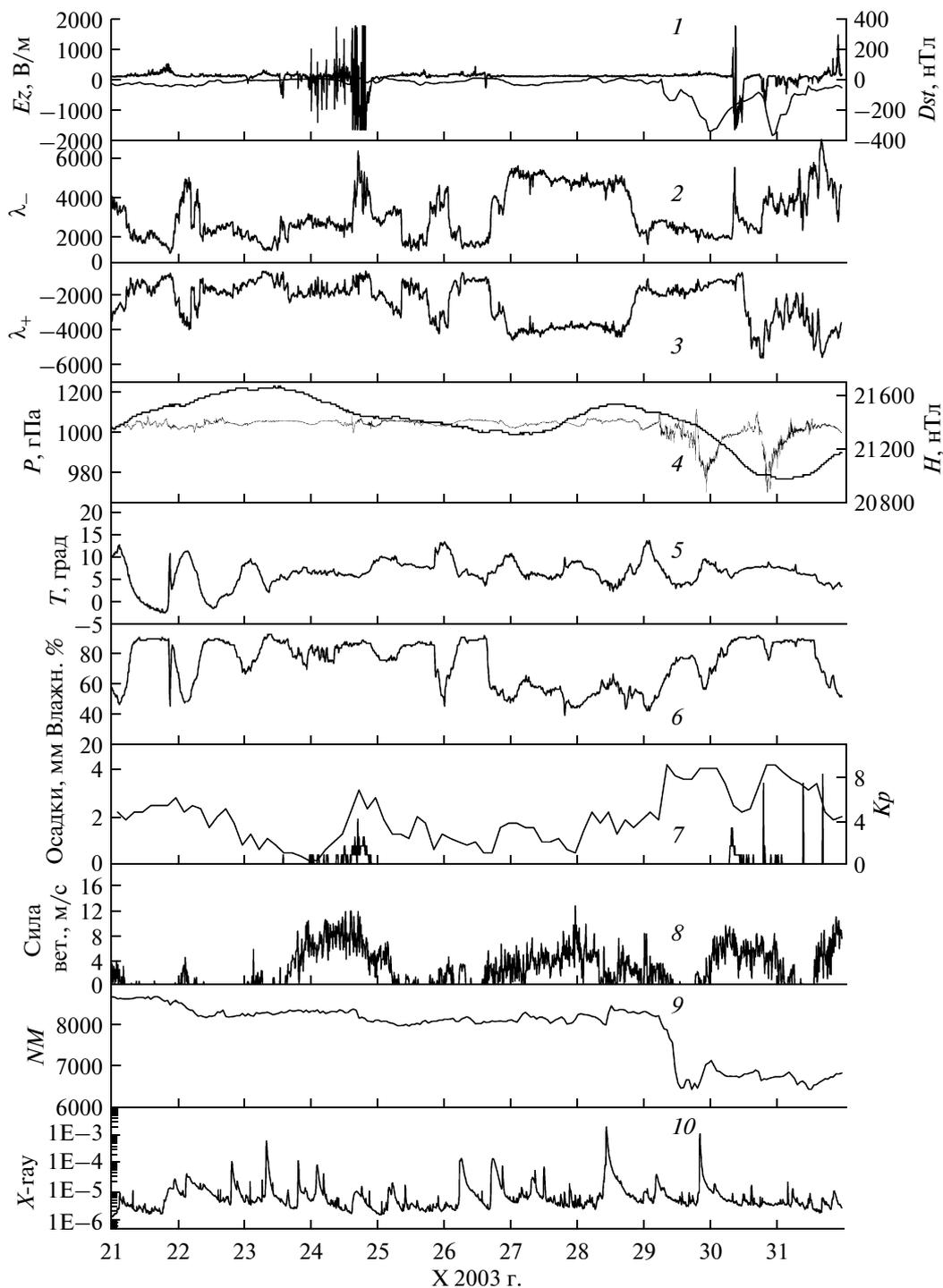


Рис. 1. Суточные вариации электропроводности воздуха, напряженности электрического поля, метеорологических, геофизических и солнечных величин в период 21–31 октября 2003 г.

рологические явления отчетливо проявились в сложном характере изменения электропроводности и напряженности электрического поля.

26 октября на Солнце произошли три вспышки: в 05:17 UT $X1.2/3B$, в 17:17 UT $X1.2/1N$, в 21:26 UT $M7.6/2N$. Вслед за ними 27 и 28 октября

суточные амплитуды температуры составляли, соответственно, 2 и 2°C за счет повышения температуры ночью до +6°C, а влажности – 5 и 10%, что привело к образованию слоисто-кучевых облаков нижнего яруса от 4 до 6 баллов, но без осадков. Как видно на рис. 1, электропроводность бы-

Вспышечные события в АО 10484 и 10486 в период 19–31 октября 2003 г. и их проявления в околоземном пространстве [Веселовский и др., 2004], данные из INTERNET: Dst – (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>); Kp – (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/kp-cgi>)

Дата	Вспышка		SC UT	Dst , нТл	Kp	СКЛ E , МэВ P , см ⁻² с ⁻¹ ср ⁻¹	ГКЛ, %	Главная фаза бури
	время, UT длит., мин	балл						
19	16:29; 79	X1.1/1N		–40	5–			
22	19:45; >41	M9.9		–33	3–			
23	08:17; 64	X5.4/1B		–21	2		–5	
23	19:50; 38	X1.1/1N		–11	1–		–5	
24	02:22; 66	M7.6/1N		–8	1+		–3	
26	05:17; 213	X1.2/3B		–27	2		–7	
26	17:17; 179	X1.2/1N		–5	3–	2 10	»	
26	21:26; 60	M7.6/2N		–16	4–		»	
27	09:21; 23	M5.0/1F		–49	2		–6	
27	12:27; 37	M6.7/1F		–41	2		»	
28	09:51; >269	X17.2/4B		–30 –80	4+ 8–	1 1000	–10	
29	20:37; 136	X10.0/2B		–233	9–	»	–5 –25	14.00– 29
30				–350	9–	»	–15	00.01 30 $\tau = 11$ ч
30				–100	9	»	–22	18.00– 30
30				–383	9	»	–24	23.00 30 $\tau = 5$ ч

ла очень высокой (~4000) и сохранялась практически постоянной в течение этих двух суток (рис. 2в). Среднесуточная величина напряженности электрического поля была очень низкой (~50 В/м). Начиная с 16:00 UT 28 октября электропроводность начала плавно уменьшаться до величины порядка 1000, оставаясь неизменной до 06:00 UT 30 октября. При этом напряженность

поля одновременно возросла до 100 В/м, также слабо изменяясь в течение выделенного интервала времени. Этот интервал совпал со временем глубокого минимума Dst -вариации и Форбуш-понижения ГКЛ. 29 и 30 октября наблюдались кучевые облака нижнего яруса от 1 до 10 баллов без осадков до 06:00 UT 30 октября. С этого момента начался обложной дождь, временами выпадал

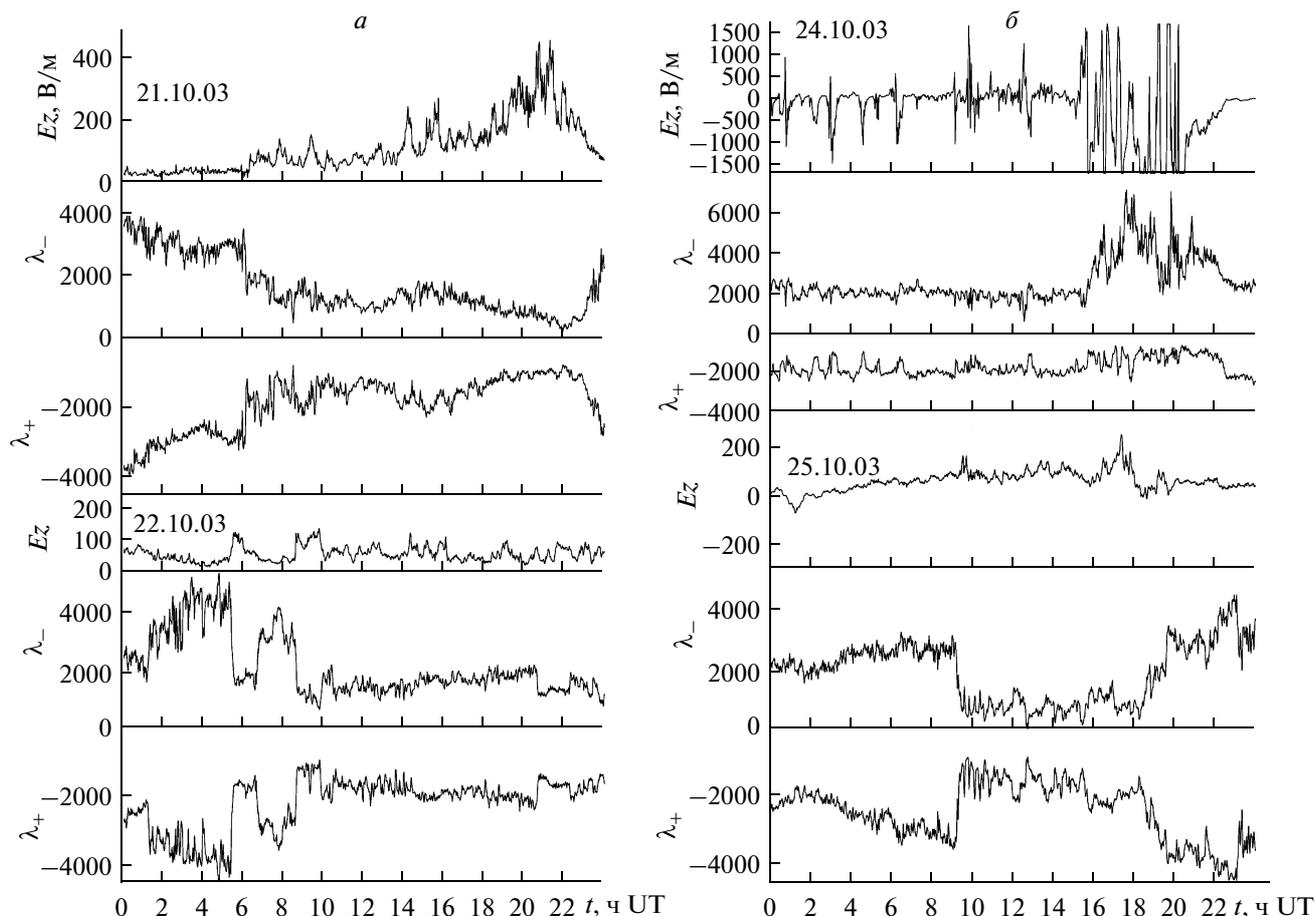


Рис. 2. Суточные вариации напряженности электрического поля и электропроводности воздуха в выделенные интервалы наблюдений (а, б, в, г).

снег. В вариациях электропроводности и напряженности электрического поля проявились соответствующие изменения, характерные для дней с осадками (см. рис. 2б, 24 октября).

Давление воздуха (рис. 1, кривая 4) в течение рассмотренного периода с 21 по 29 октября изменялось в пределах 1000–1020 гПа, за исключением периода 29–31 октября, когда после геомагнитной бури наблюдался отрицательный перепад давления с величины 1010 до 980 гПа.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поведение экспериментально наблюдаемой электропроводности воздуха как удельной проводимости столба воздуха сечением 1 см² и высотой h в модели шарового конденсатора описывается следующим образом [Тверской, 1949]:

$$\lambda = \sum n_i u_i e = e \sum (n_{л} u_{л} + n_{с} u_{с} + N u_{т}),$$

где e — элементарный заряд; n_i — концентрация ионов i — го сорта; u_i — их подвижность; N и u_т — концентрация и подвижность тяжелых ионов. В

приземной атмосфере концентрация легких и средних ионов одного порядка по величине (n_i ~ 200–300 см⁻³), а N ~ 5000 см⁻³. Но подвижность средних и тяжелых ионов соответственно на два и на четыре порядка по величине ниже, чем легких ионов. Так что проводимость воздуха определяется преимущественно легкими ионами обоих знаков: λ = λ₊ + λ₋. Концентрация и подвижность легких ионов зависят от воздействия ионизаторов воздуха и его температуры [Брикар, 1969], а также от турбулентного состояния пограничного слоя атмосферы, которое, в свою очередь, зависит от термобарического режима атмосферы [Тверской, 1949]. Исходя из этих зависимостей, качественно можно объяснить поведение электропроводности в рассматриваемый нами период. Так, в условиях “хорошей погоды” 21–22 октября суточные вариации электропроводности близко согласуются с суточными вариациями температуры и влажности воздуха: днем при высокой температуре благодаря увеличению подвижности легких ионов, а также, возможно, интенсивному образованию легких ионов в ре-

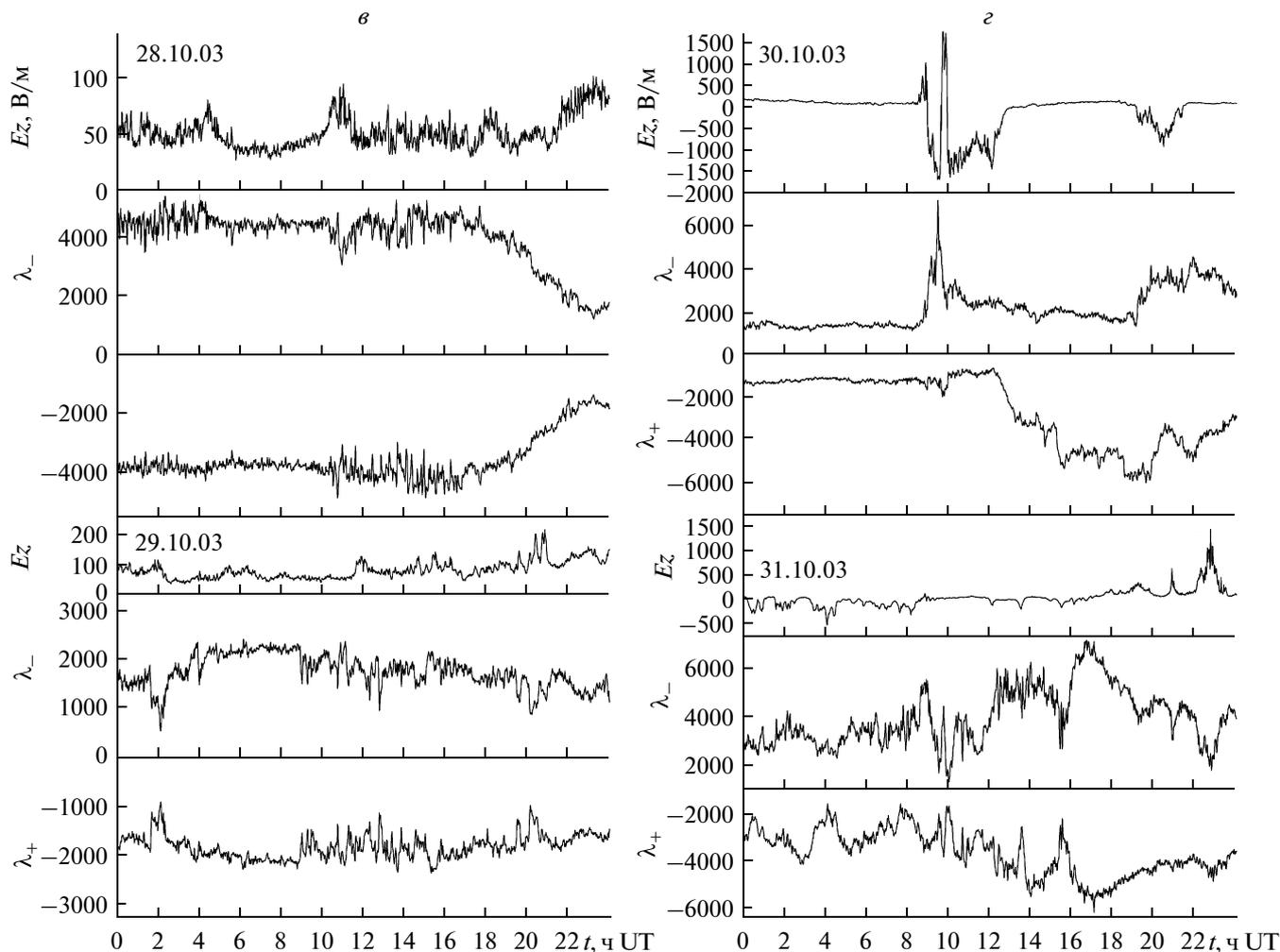


Рис. 2. (Окончание).

зультате благоприятного выхода подпочвенных газов, содержащих радон, электропроводность высокая (~4000). Соответственно низкая величина напряженности поля. С понижением температуры воздуха величина электропроводности плавно уменьшается, оставаясь практически постоянной (~1000) в ночное время со слабыми колебаниями. В это время, как видно на рис. 1, кривая б, влажность воздуха возросла до величины ~90% в виде капель воды, на которые, по-видимому, и стали оседать легкие ионы, в результате чего их концентрация уменьшилась. Кроме того, при низких температурах уменьшается их подвижность и выход подпочвенных газов. Соответственно возрастает напряженность электрического поля (см. рис. 2а). Минимум в суточном ходе электропроводности наступает на восходе Солнца в результате действия локального конвективного генератора, когда вместе с нагретым теплым воздухом выносятся вверх ионы. Это приводит к уменьшению их концентрации и соответственно

росту напряженности электрического поля [Смирнов, 2013].

При наличии облаков разного типа и особенно облаков нижнего яруса, содержащих преимущественно отрицательные заряды в нижней их части, уменьшается средний суточный уровень напряженности электрического поля с искажением его суточного хода на восходе Солнца [Имянитов и Чубарина, 1965]. При выпадении осадков, несущих объемные заряды к поверхности земли, электропроводность также резко изменяется (см. рис. 2б и 2г, 24 и 30 октября).

Но кроме локальных ионизаторов, в атмосфере постоянно действуют и глобальные ионизаторы. Это солнечные и галактические космические лучи, которые испытывают сильные вариации во время солнечных вспышек и геомагнитных бурь. В период 21–31 октября, как видно на рис. 22 в работе [Веселовский и др. 2004], после сильной солнечной вспышки 26 октября поток ядер СКЛ в северном полушарии 27 октября возрос с 1 до

$\sim 10^2$, а 28–29 октября – до $\sim 10^3$ ч/см² с ср при спокойных вариациях ГКЛ (см. рис. 1, кривая 9). При этом, как известно, снижается граница жесткого обрезания потоков СКЛ. Это не могло не привести к росту концентрации в верхней тропосфере и соответственно проводимости во всем столбе воздуха. По-видимому, этим процессом качественно можно объяснить высокий постоянный уровень электропроводности в течение суток 27 и 28 октября. Но с началом геомагнитной бури и вступлением эффекта Форбуш-понижения ГКЛ в 16:00 UT, который, по-видимому, подавил действие СКЛ, при слабом изменении температуры воздуха электропроводность начинает уменьшаться с 4000 до 1000, оставаясь неизменной до 06:00 UT 30 октября (рис. 2*в* и 2*г*). Одновременно возросла напряженность поля с 50 до 100 В/м. Этот интервал времени совпал со временем глубокого минимума *Dst*-вариации и Форбуш-понижения ГКЛ. Таким образом, глобальный источник ионизации атмосферы подавил действие локальных источников: и конвективного генератора, и облаков, и осадков.

Более сложная ситуация наблюдалась в вариациях метеорологических величин, особенно температуры и влажности. По данным местной метеорологической станции в период с 21 по 31 октября облака по форме изменялись от верхнеслоистых (21–22 октября) до кучево-дождевых, сопровождаемых грозовыми процессами и ливневыми дождями (24 и 30 октября). Вместе с тем известно (см., например, [Матвеев, 2000]), что образование облаков, особенно кучево-грозовых форм, связано с дополнительным притоком солнечной радиации, когда с повышением температуры и влажности потоки нагретого воздуха, содержащего водяной пар, поднимаются вверх. Процесс изменения этих величин отчетливо прослеживается на рис. 1 (кривые 5 и 6) 24–25 и 27–28 октября. А именно: благодаря значительному повышению температуры в ночное время с одновременным повышением влажности воздуха суточные амплитуды температуры и влажности в эти дни уменьшились соответственно до 5°C и 0.5% по сравнению с условиями “хорошей погоды” 21–22 октября (7.5–8°C и 22.5%). Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что в нижнюю атмосферу действительно поступил значительный дополнительный поток солнечной радиации даже при наличии облачности, снижающей прозрачность атмосферы. Совпадение по времени этих периодов с моментами солнечных вспышек 23 и 28 октября позволяет полагать, что суточные аномалии температуры и влажности воздуха вызваны высокой солнечной активностью. Во время солнечных вспышек, как известно, наблюдается усиление потоков солнечного излучения не только в полосе *X*-лучей как показателе интенсивности вспышки, но и в более широ-

кой полосе [Fletcher et al., 2011], особенно в случаях, когда вспышки происходят вблизи центра диска, как это имело место в октябре 2003 г. [Woods et al., 2004]. По данным космического аппарата NASA Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) 28 октября было зарегистрировано усиление полного потока энергии излучения приблизительно в 50 раз по сравнению с уровнем до вспышки. Около 50% от полной энергии излучения приходится на ближний ультрафиолет ($\lambda \sim 200$ нм) и видимую часть спектра [Woods et al., 2006]. Обнаружено также заметное усиление потока и в инфракрасной полосе на $\lambda = 1.553$ мн [Fontela et al., 2004]. Из полного спектра излучения в нижнюю атмосферу поступает только часть его через так называемое “окно прозрачности”. Оно включает в себя ближний ультрафиолет и видимую полосу ($\lambda = 1000 - 2 \times 10^4$ Å, 100–2000 нм), т.е. максимум интенсивности солнечного излучения (см., например, [Физика космоса, с. 39. 1986], а также полосу инфракрасного излучения ($\lambda = 1-20$ нм). По-видимому, именно в этой полосе излучения и поступал дополнительный приток тепла во время солнечных вспышек в октябре 2003 г. (Мы не касаемся вопроса вариаций прозрачности атмосферы в зависимости от геомагнитной активности, наблюдаемых на субавроральных обсерваториях [Пудовкин, 1996], поскольку в obs. “Паратунка” отсутствовали актинометрические измерения).

Дополнительным источником теплового излучения, поступающего в атмосферу Земли в период с 21 по 31 октября, можно рассматривать также всплески белого света (white-light flares). Это излучение включает в себя непрерывный спектр в широком диапазоне длин волн. Максимум излучения лежит в полосе 360–400 нм [Neidig, 1989], а по мощности в импульсе это излучение одного порядка по величине с излучением в полосе мягкого рентгена [Hudson, 1983] и способно проникать в нижнюю атмосферу. Вспышки белого света были зарегистрированы 23 октября при интенсивности *X*-лучей *M* 2.4 (т.е. при умеренном импульсном всплеске) в 02:35.00 UT с продолжительной гладкой составляющей высокой интенсивности [Hudson et al., 2006]. 28 и 29 октября также была зарегистрирована вспышка белого света, но при существенно более высоких значениях интенсивности *X*-лучей (соответственно *X*17/4*B*, *X*10/2*B*). Более того, также наблюдалось усиление интенсивности излучения в инфракрасном “хвосте” спектра вспышки [Maurya and Ambastha, 2009]. Не исключено, что эти всплески могли внести свой вклад в нарушение суточного хода температуры и влажности.

Особый интерес вызвало восстановление нормального суточного хода температуры и влажности воздуха 29 октября, когда скорость ветра понизилась до 2 м/с при отсутствии осадков, т.е. выполнялись условия “хорошей погоды”. Это явление

можно объяснить с учетом результатов регистрации плотности потоков излучения на КА SORCE, когда в видимом диапазоне волн ($\lambda = 300\text{--}2000$ нм) интенсивность уменьшилась из-за наличия пятен на диске Солнца [Woods et al., 2004].

Обращает на себя внимание еще и тот факт, что на вторые сутки после геомагнитной бури наблюдался отрицательный суточный перепад давления ~ 30 гПа.

4. ВЫВОДЫ

Исследования суточных вариаций электропроводности воздуха, напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. показали следующее:

1. Суточные вариации электропроводности и соответственно напряженности электрического поля проявили сильную зависимость от температуры и влажности воздуха. Этот вывод совпадает с ранее известными результатами (см., например, [Попов, 2008]).

2. Обнаружено увеличение электропроводности воздуха в течение двух суток накануне геомагнитной бури 29–30 октября в результате действия СКЛ и уменьшение ее во время Форбуш-понижения ГКЛ с соответствующим ростом напряженности электрического поля.

3. Наблюдаемое аномальное повышение температуры и влажности в процессе развития солнечной активности привело к образованию облаков различной формы, включая кучево-дождевые, сопровождаемые ливнями и грозовыми процессами.

4. Совпадение по времени периодов нарушений регулярных метеорологических процессов с последовательностью сильных солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в полсе ближнего ультрафиолета, видимой и инфракрасной частей спектра, позволяет рассматривать их в качестве дополнительного притока тепловой энергии в нижнюю атмосферу.

5. Обнаружен отрицательный суточный перепад давления на второй день после геомагнитной бури 29–30 октября.

6. Все перечисленные выше выводы совпадают с результатами подобного анализа солнечных событий в ноябре 2004 г. [Смирнов и др., 2013].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеоздат. С. 68–105. 1969.
- Веселовский И.С. и + 52 соавтора. Солнечные и геиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.
- Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы // Л.: Гидрометеоздат, 240 с. 1965.
- Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. С.-Петербург: Гидрометеоздат, 778 с. 2000.
- 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.
- Никифорова Н.Н., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубачки М., Михневски С. Необычные вариации атмосферного электрического поля во время главной фазы сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. на Польской среднширотной обсерватории Свидер // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 148–152. 2005.
- Панасюк М.Н. и + 55 соавторов. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–554. 2004.
- Парамонов Н.А. Исследование связи между активностью Солнца и градиентом потенциала электрического поля в атмосфере по материалам станций Советского Союза за 1957–1967 гг. // Атмосферное электричество. Тр. ГГО. Л.: Гидрометеоздат. Вып. 2. С. 125–129. 1969.
- Попов И.Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Атмосферное электричество. Тр. ГГО. С.-Петербург: Гидрометеоздат. Вып. 558. С. 152–161. 2008.
- Пудовкин М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Соросовский образовательный журн. № 10. С. 106–113. 1006.
- РД 52.04.168-2001. Методические указания. Наблюдение за электрическим полем. С.-Петербург: Гидрометеоздат. С. 23. 2002.
- Смирнов С.Э. Влияние конвективного генератора на суточный ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 547–552. 2013.
- 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 аэрономия. Т. 53. № 4. С. 532–546. 2013.
- Тверской П.Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат, 252 с. 1949.
- Физика космоса. М.: Сов. энциклопедия, 783 с. 1986.
- Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al. An observational overview of solar flares // Space Sci. Rev. V. 159. P. 19–106. DOI: 10.1007/S11214-010-9701-8. 2011.
- Fontenla J.M., Harder J., Rottman G. et al. The signature of solar activity in the infrared spectral irradiance // Astrophys. J. V. 605. № 1. P. L85–L88. 2004.

- *Hudson H.S.* Upper limits on the total radiated energy of solar flares // *Sol. Phys.* V. 86. № 1/2. P. 123–130. 1983.
- *Hudson H.S., Wolfson C.J., Metcalf T.R.* White-light flares: a TRACE/RHESSI overview // *Sol. Phys.* V. 234. P. 79–93. DOI: 10.1007/s11207-006-0056-y. 2006.
- *Maurya R.A., Ambastha A.* Transient magnetic and Doppler features related to the white-light flares in NOAA 10486 // *Sol. Phys.* V. 258. P. 31–52. DOI: 10.1007/s11207-009-9397-7. 2009.
- *Neidig D.F.* The importance of solar white light flares // *Sol. Phys.* V. 121. № 1/2. P. 261–269. 1989.
- *Roble R.G.* On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity // *J. Geophys. Res.* V. 90. № D4. P. 6000–6012. 1985.
- *Woods T.N., Eparvier F.G., Fontenla J. et al.* Solar irradiance variability during the October 2003 solar storm period // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. № L10802. DOI: 10.1029/2004 GL 019571. 2004.
- *Woods T.N., Kopp G., Chamberlain Ph.C.* Contributions of the solar ultraviolet irradiance to the total solar irradiance during large flares // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A 10S14. DOI: 10.1029/2005. JAO 11507. 2006.