

УДК 551.594.2;551.52

ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ

© 2017 г. С. Э. Смирнов¹, *, Г. А. Михайлова², **, Ю. М. Михайлов², 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. Москва, г. Троицк

*e-mail: sergey@ikir.ru

**e-mail: yumikh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 28.09.2016 г.

После доработки 03.04.2017 г.

Впервые детально исследованы суточные вариации электрических (квазистатического электрического поля и электропроводности) и метеорологических (температура, давление, относительная влажность атмосферы и скорость ветра) величин, измеренных одновременно перед сильными Курильскими землетрясениями: 15 ноября 2006 г., $M = 8.3$; 13 января 2007 г., $M = 8.1$; 30 января 2016 г., $M = 7.2$. Получено, что в течение 6 – 7 дней до момента землетрясений наблюдался последовательно аномальный рост температуры, вопреки отрицательному регулярному тренду в эти зимние месяцы. Аномальный рост температуры привел к формированию условий “зимней грозы” в приземной атмосфере на Камчатке. А именно: появление аномального электрического сигнала второго типа, усиление электропроводности и ее сильной изменчивости, появление обильных осадков в виде снежных ливней, высокой относительной влажности воздуха, штормовых ветров и перепадов давления. При слабом потоке естественного теплового излучения в эти сезоны года наблюдаемую динамику электрических и метеорологических процессов, по-видимому, можно объяснить появлением дополнительного источника теплового излучения сейсмической природы.

DOI: 10.7868/S0016794017050170

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые нестационарные аномалии уходящего от Земли потока инфракрасного (ИК) излучения были обнаружены на спутнике NOAA-AVHRR при пролете над Среднеазиатской сейсмически активной зоной [Горный и др., 1988; Сальман и Тронин, 1990]. Оказалось, что за несколько дней до землетрясений (ЗТ) наблюдаются положительные аномалии ИК-излучения (преимущественно в ночное время), а наиболее сильный эффект проявляется в предрассветные часы. Этот процесс развивается на больших пространственных масштабах вдоль разломов перед коровыми землетрясениями с магнитудой $M > 4.5$. Одновременные измерения температуры почвы и воздуха позволили сделать вывод, что источник уходящего ИК – излучения находится либо непосредственно на поверхности, либо под землей. Это явление вызвало больший интерес как признак предстоящего землетрясения в совокупности с другими геофизическими аномалиями до него. Исследования этого явления проводились либо только по космическим снимкам

потоков излучения, полученным на серии спутников (NASA) [Tronin et al., 2002; Ouzounov et al., 2007; Бондур и Воронова, 2012]; либо с использованием одновременных записей на метеорологических спутниках GOES [Ouzounov et al., 2006]; либо по измерениям температуры и дебита воды в скважинах [Tronin et al., 2004]. Тепловые аномалии были обнаружены также в вариациях температуры атмосферы по данным метеорологических станций в течение нескольких недель до сильных землетрясений в Мексике в период с 1973 по 2003 г. [Dunajevska and Pulinets, 2005].

Насколько известно авторам, до настоящего времени отсутствуют одновременные исследования тепловых аномалий и квазистатического электрического поля в приземной атмосфере в сейсмически активных зонах накануне сильных землетрясений. Впервые аномалия электрического поля необычного вида была зарегистрирована на Камчатке перед ЗТ с магнитудой $M = 7.0$ 13 ноября 1993 г. [Руленко и др., 1996]. Одновременно наблюдалось усиление естественного

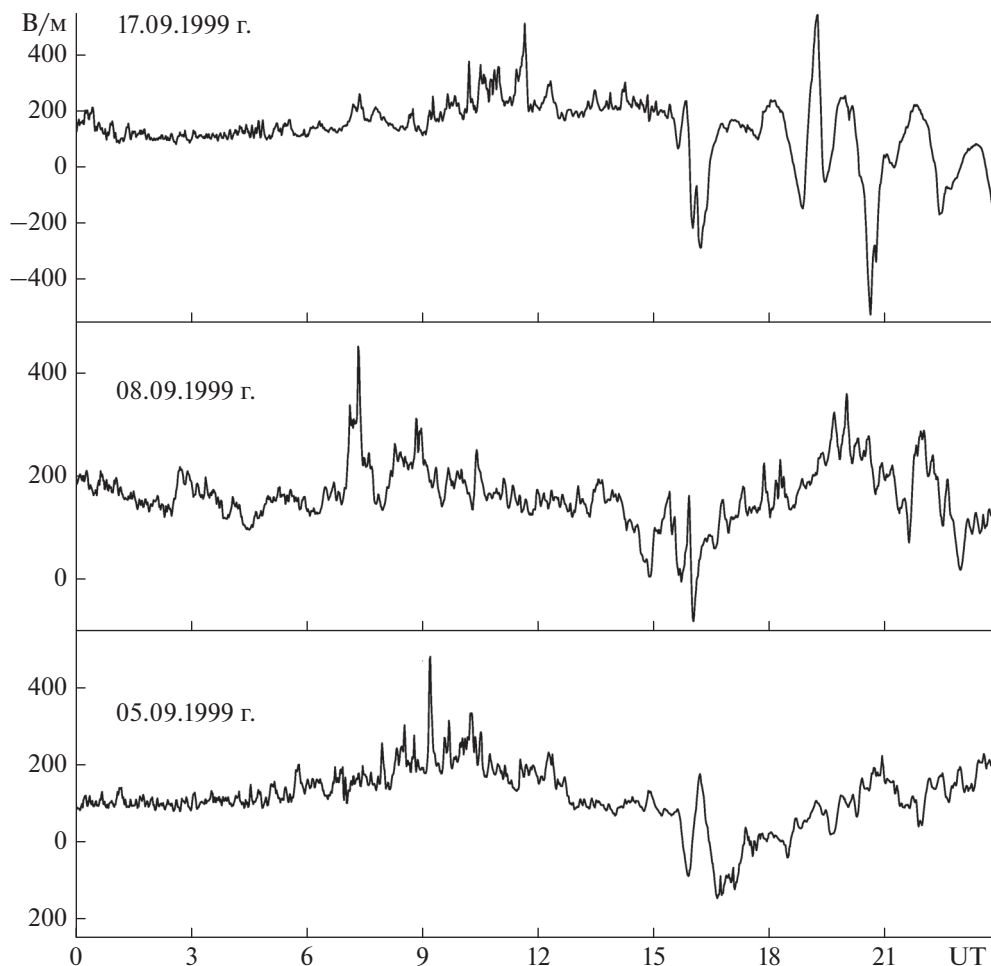


Рис. 1. Аномалия электрического поля первого типа накануне трех землетрясений (см. таблицу).

электромагнитного излучения на частоте $f = 1.2$ кГц, в то время как на других частотах (5.4; 8.3 кГц) эффект отсутствовал (характерное явление для локальной грозовой активности [Михайлова и др., 2010]). Временная форма аномального электрического сигнала представляла собой колебания большой интенсивности, характерные для локальной грозовой активности [Михайлов и др., 2006; Михайлова и др., 2010]. Этот аномальный электрический сигнал автор [Руленко, 2000] отнес ко второму типу, в отличие от аномалии первого типа, показанной в качестве примера на рис. 1 накануне трех землетрясений (см. таблицу). Как видно, сигналы этого типа представляют собой бухтообразное понижение интенсивности длительностью несколько часов (в некоторых случаях даже со сменой знака [Smirnov, 2008]) и наблюдаются преимущественно накануне относительно слабых землетрясений [Pierce, 1976; Kondo, 1986; Nao, 1988; Smirnov, 2008; Silva et al., 2011]. Традиционно аномалии электрического поля такого вида объясняют влиянием радона на электропроводность приземной атмосферы, концентрация которого заметно

возрастает в процессе активного образования трещин перед землетрясениями. В свою очередь, интенсивность радиоактивных газов, поступающих в приземную атмосферу, зависит и от метеорологических величин: температуры, относительной влажности и давления атмосферы, в вариациях которых перед землетрясениями были выделены предвестники [Милькис, 1986]. Очевидно, что наличие аномалий электрического поля двух типов указывает на их различную природу, обусловленную сложным взаимодействием между электрическими и метеорологическими процессами в приземной атмосфере перед землетрясениями.

В настоящей работе проанализированы суточные вариации электрических величин (электропроводность воздуха и напряженность квазистатического электрического поля) в совокупности с вариациями метеорологических величин (температура, относительная влажность, давление и скорость ветра) в приземной атмосфере Камчатки накануне сильных землетрясений.

Характеристики землетрясений, произошедших вблизи Камчатки в рассмотренные периоды

<i>n</i>	Дата	Время	φ° N	λ° E	<i>h</i> , км	<i>M</i>
1	06.09.1999	15.04:52.81	52.10	159.15	55	5.0
2	09.09.1999	14.02:01.59	47.51	154.33	33	5.6
3	18.09.1999	21.28:33.17	51.21	157.56	60	6.0
4	12.11.2006	14.42:24	55.164	165.295	37.4	5.0
5	15.11.2006	11.14:13.57	46.592	153.266	30.3	8.3
6	08.01.2007	16.23:38.00	54.297	159.170	136.5	4.6
7	11.01.2007	04.27:26.32	60.955	165.478	10.0	5.0
8	13.01.2007	04.23:21.16	46.243	154.524	10.0	8.1
9	13.01.2007	17.35:22.51	54.796	166.192	10.0	4.9
10	13.01.2007	17.37:06.31	46.913	156.276	10.0	6.0
11	22.01.2016	13:26:45	49.819	155.768	67.2	4.8
12	26.01.2016	05.05:18	51.207	157.446	72.2	4.8
13	28.01.2016	16.42:11	46.366	152.347	44.6	4.8
14	30.01.2016	00.16:39	48.529	153.465	152.9	5.2
15	30.01.2016	03.25:12	53.978	158.546	177.0	7.2
16	30.01.2016	03.57:02	53.605	158.802	172.4	4.5
17	30.01.2016	06.53:49	54.181	158.712	156.4	4.6
18	31.01.2016	04.25:58	46.824	150.543	146.2	4.6

2. ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Рассмотрены суточные вариации электрических и метеорологических величин в obs. “Паратунка” ДВО РАН ($\varphi = 52.97^\circ$ N; $\lambda = 158.25^\circ$ E) накануне трех сильных землетрясений с магнитудой $M > 7$, произошедших на Камчатке в 2006, 2007 и 2016 гг. Напряженность квазистатического электрического поля (E_z – компонента, В/м) измерена прибором “Поле-2”; электропроводность атмосферы, обусловленная отдельно положительными (σ_+) и отрицательными (σ_-) ионами (либо фСм/м, либо в относительных единицах) – прибором “Электропроводность-2”; давление (P , гПа), температура (T , °C), влажность (H , %), скорость ветра (V , м/с) – цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Все величины измерены с дискретностью по времени 10 мин.

На рисунке 2 приведены записи суточных вариаций наблюдаемых величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г.: $t = 11:14$ UTC; $M = 8.3$; $h = 30.3$ км; $\varphi = 46.614^\circ$ N; $\lambda = 153.23^\circ$ E в период с 7 по 15 ноября ($R = 10^{0.43M} = 3707$ км; $r \sim 800$ км, где R – радиус сейсмически активной зоны в коре Земли накануне ЗТ [Dobrovolsky et al., 1979]), r – расстояние от обсерватории до эпицентра). 7 ноября при скорости ветра менее 4 м/с, при практически по-

стоянном давлении, в отсутствии облачности (данные местной метеостанции) в приземной атмосфере сохранялись условия “хорошей погоды” [РД 52.04, 2002]. В это время наблюдались слабые суточные вариации величины E_z в пределах 100 ± 50 В/м (на рисунке левая ось ординат); слабые вариации электропроводностей обоих знаков; регулярный суточный ход температуры с максимумом $+5^\circ\text{C}$ в местный полдень (01.30 UT) и минимумом -3°C перед восходом Солнца; регулярный суточный ход относительной влажности (в противофазе с температурой) от 40 до 70% соответственно. Эти условия в приземной атмосфере сохранялись и в предшествующие дни до 7 ноября.

Как видно на рисунке, в период с 7 ноября наблюдался положительный тренд температуры, связанный, по – видимому, с включением дополнительного источника тепла, который действовал в течение десяти дней до 16 ноября, последовательно повышая среднюю температуру атмосферы от $+1$ до $+6^\circ\text{C}$, вопреки отрицательному тренду в это время года [www.pogodaiklimat.ru]. Относительная влажность воздуха в нарушение регулярного суточного хода сохранялась практически неизменной и очень высокой: $\sim 90\%$ и выше. Одновременно, согласно данным [www.pogodaiklimat.ru], зарегистрированы обильные осадки. В некоторые дни (8, 13, 15 ноября) на графике температуры появи-

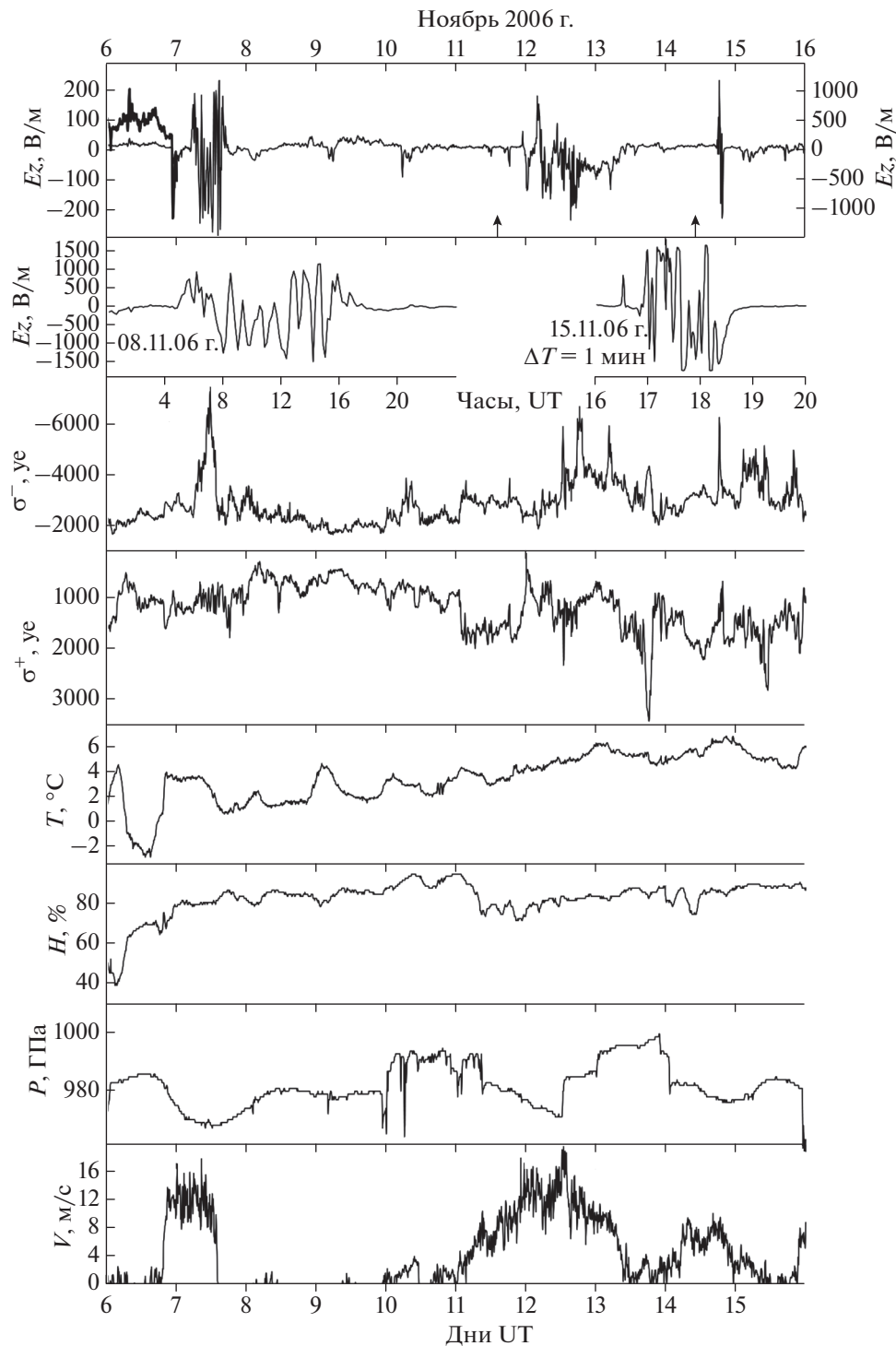


Рис. 2. Динамика суточных вариаций электрических (E_z — компоненты поля, электропроводности σ_+ и σ_-) и метеорологических (температуры $T^\circ\text{C}$, относительной влажности $H, \%$, давления атмосферы P и скорости ветра V) величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г. Стрелки на рисунке — моменты землетрясений (см. таблицу).

лись кратковременные всплески $\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$, которые сопровождалось появлением в вариациях электрического поля знакопеременных колебаний большой интенсивности: ± 1000 В/м (правая ось ординат; на вставке более детально с шагом дискретиза-

ции $\Delta t = 1$ мин показаны аномалии электрического поля второго типа 8 и 15 ноября) и значительным ростом электропроводности (особенно отрицательного знака), связанной с обильными осадками и в два-три раза превышающей значения в условиях

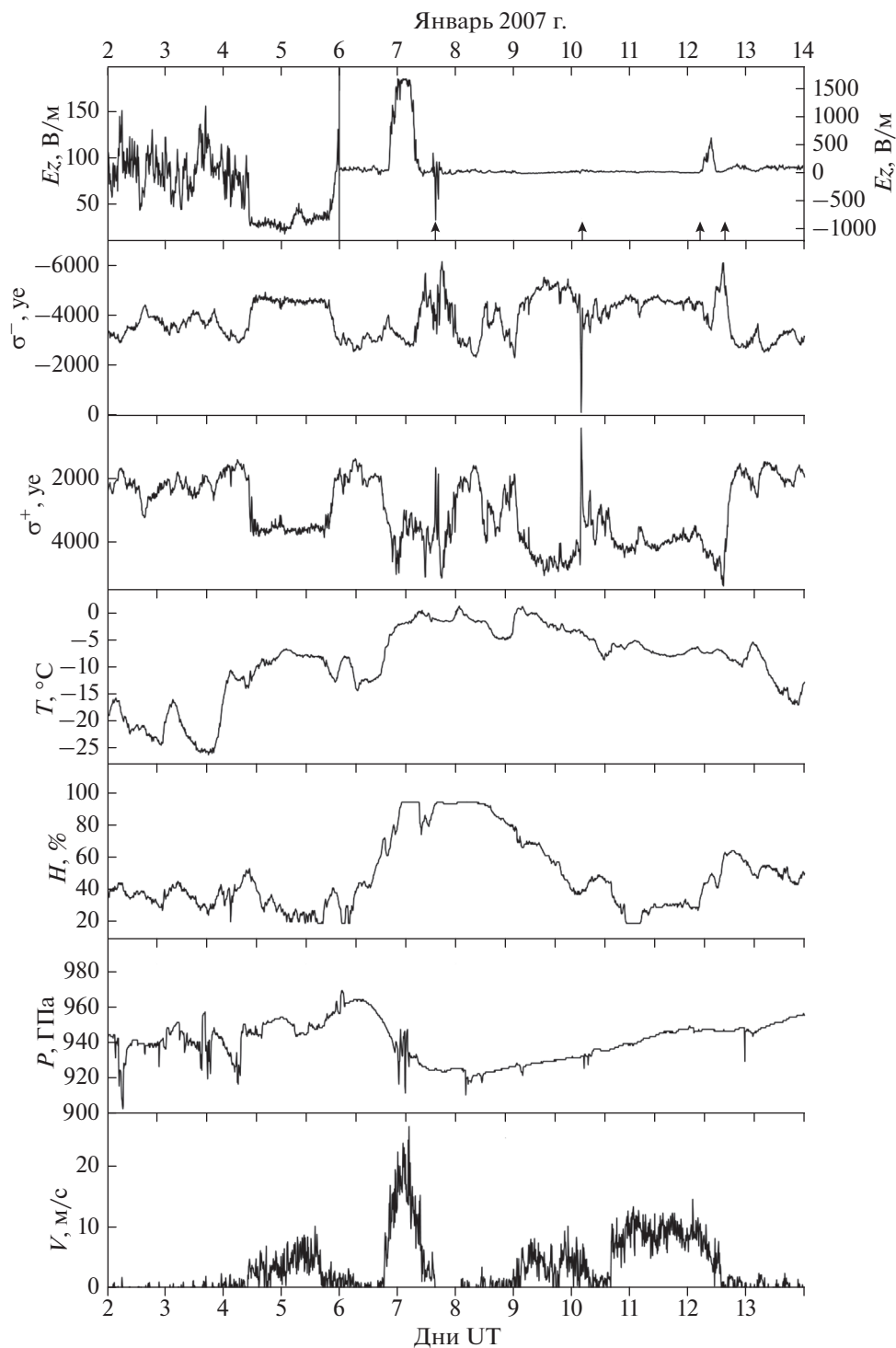


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но перед землетрясением 13 января 2007 г.

“хорошей погоды”. Одновременно наблюдалось резкое понижение атмосферного давления и усиление ветра до 16 м/с, т.е. происходили метеорологические явления, характерные для условий локальной грозовой активности в приземной атмосфере. Эти процессы наблюдались до момента сильного ЗТ, указанного стрелкой на рисунке, и

сохранились на следующий день после него. Далее источник дополнительного тепла как бы выключился, и во второй половине дня 16 ноября восстановились условия “хорошей погоды”.

На рисунке 3 приведены суточные вариации наблюдаемых величин при землетрясении 13 января 2007 г.: $t = 04:23$ UTC; $M = 8.1$; $\varphi = 46.48^\circ$ N,

$\lambda = 154.07^\circ \text{ E}$, $h = 10 \text{ км}$ ($R = 3041 \text{ км}$; $r \sim 800 \text{ км}$). В этом случае процессы в приземной атмосфере развивались так же, как и при землетрясении 15 ноября 2006 г. А именно: 3 и 4 января в атмосфере сохранялись условия “хорошей погоды” со слабым ветром; низким давлением; регулярным суточным ходом температуры от -15°C до -27°C и низкой относительной влажностью ($\sim 40\%$); низкими значениями электропроводности и со слабо возмущенными вариациями электрического поля в пределах 50–120 В/м (отдельный фрагмент на рисунке с левой осью ординат). 5 января включился дополнительный источник тепла, благодаря действию которого температура возросла до -10°C . При этом при постоянстве давления и низкой относительной влажности в полтора-два раза увеличилась электропроводность и уменьшилась напряженность электрического поля ниже 50 В/м. При дальнейшем росте температуры 7 января усилился ветер до 20 м/с, возросла относительная влажность до 90%, и в электрическом поле возник отклик до величины $\sim 1500 \text{ В/м}$, который сопровождался высокой температурой и высокой относительной влажностью (согласно данным местной метеослужбы, ливневыми осадками). Благодаря осадкам, несущим объемные заряды, электропроводность обоих знаков увеличилась более чем в два раза по сравнению с условиями “хорошей погоды” и испытывала заметные колебания в течение этого периода. Данные этого рисунка интересны тем, что при высокой температуре, но низкой влажности наблюдаются усиление электропроводности и соответственно ослабление электрического поля. Мощные всплески электрического поля грозовой природы происходили в условиях, когда температура аномально возросла (практически до нуля) при столь же аномально высокой относительной влажности (~ 100).

На рисунке 4 показаны суточные вариации наблюдаемых величин при землетрясении 30 января 2016 г.: $t = 03:25:12 \text{ UTC}$; $M = 7.2$; $\phi = 53.98^\circ \text{ N}$, $\lambda = 158.55^\circ \text{ E}$, $h = 172.4 \text{ км}$ ($R = 1247 \text{ км}$; $r = 113 \text{ км}$). В отличие от предыдущих случаев, поведение рассматриваемых величин иное. В суточном ходе температуры отсутствует положительный тренд, но выделяются два периода повышенных значений: 20 и 25–27 января, когда среднесуточные значения возросли до -2°C и до -6°C соответственно при нерегулярных вариациях относительной влажности. В этот период наблюдалось усиление ветра до 15 м/с. Согласно [www.pogodai-klimat.ru], в эти дни выпал обильный снег, в результате чего в несколько раз возросла электропроводность и в вариациях электрического поля наблюдались сильные всплески до 1000 В/м, характерные для таких метеорологических условий. Для сравнения, в условиях “хорошей погоды”, когда скорость ветра была ниже 4 м/с 18 и 23–24 января, в вариациях температуры отмечался регулярный суточ-

ный ход, отсутствующий в суточных вариациях относительной влажности, высокое атмосферное давление, низкая электропроводность и характерные слабые вариации электрического поля (левая ось ординат). По-видимому, в указанные выше дни действовал дополнительный источник тепла.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Как следует из архивов метеослужбы [www.pogodai-klimat.ru], зимние грозы на Камчатке случаются в среднем один раз в пять лет. Это редкое метеорологическое явление сопровождается обильными осадками в виде ледяного дождя или ливневого снега. Именно такое явление (по данным местной метеослужбы) наблюдалось в периоды рассмотренных нами трех сильных ЗТ в ноябре 2006 г., январе 2007 г. и январе 2016 г. с магнитудами $M = 8.3$; 8.1; 7.2 соответственно. Для возникновения грозовой активности в эти месяцы недостаточно тепла, поступающего от Солнца. Следовательно, для образования кучево-дождевых облаков, определяющих состояние грозовой активности в приземной атмосфере, необходим дополнительный источник теплового излучения. Проследим последовательно эффекты зимней грозы в суточных вариациях рассмотренных нами величин. Появилась аномалия электрического поля как знакопеременного, так и однополярного вида величины $E \sim 1000\text{--}1500 \text{ В/м}$, в десятки раз превышающей сигнал в условиях “хорошей погоды”. Такой вид сигнала характерен в условиях грозовой активности в теплое время года. Процесс сопровождался шквальным ветром ($V \sim 15\text{--}25 \text{ м/с}$), обильным ливневым снегом, что отразилось в высокой относительной влажности ($\sim 90\text{--}100\%$), сохраняющейся практически неизменной в течение нескольких дней. Обильный снегопад и высокая влажность привели дополнительно к образованию в приземной атмосфере объемных зарядов, вызвавших сильный рост и изменчивость электропроводности воздуха (величина ее возросла в несколько раз по сравнению с условиями “хорошей погоды”). Но самая заметная аномалия наблюдалась в суточных вариациях температуры воздуха, а именно: в нарушении регулярных суточных вариаций и вопреки регулярному отрицательному тренду. Ее величины в эти зимние месяцы в течение 6–7 суток последовательно возрастали от 0°C до $+7^\circ\text{C}$; от -25°C до 0°C ; от -25°C до -5°C соответственно. Можно предположить, что именно этот дополнительный источник теплового излучения вызвал наблюдаемые эффекты в суточных вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере и определил природу аномального электрического сигнала второго типа. Источник этого излучения, как следует из одновременных измерений температуры в почве и на поверхности земли [Горный и др., 1988], рас-

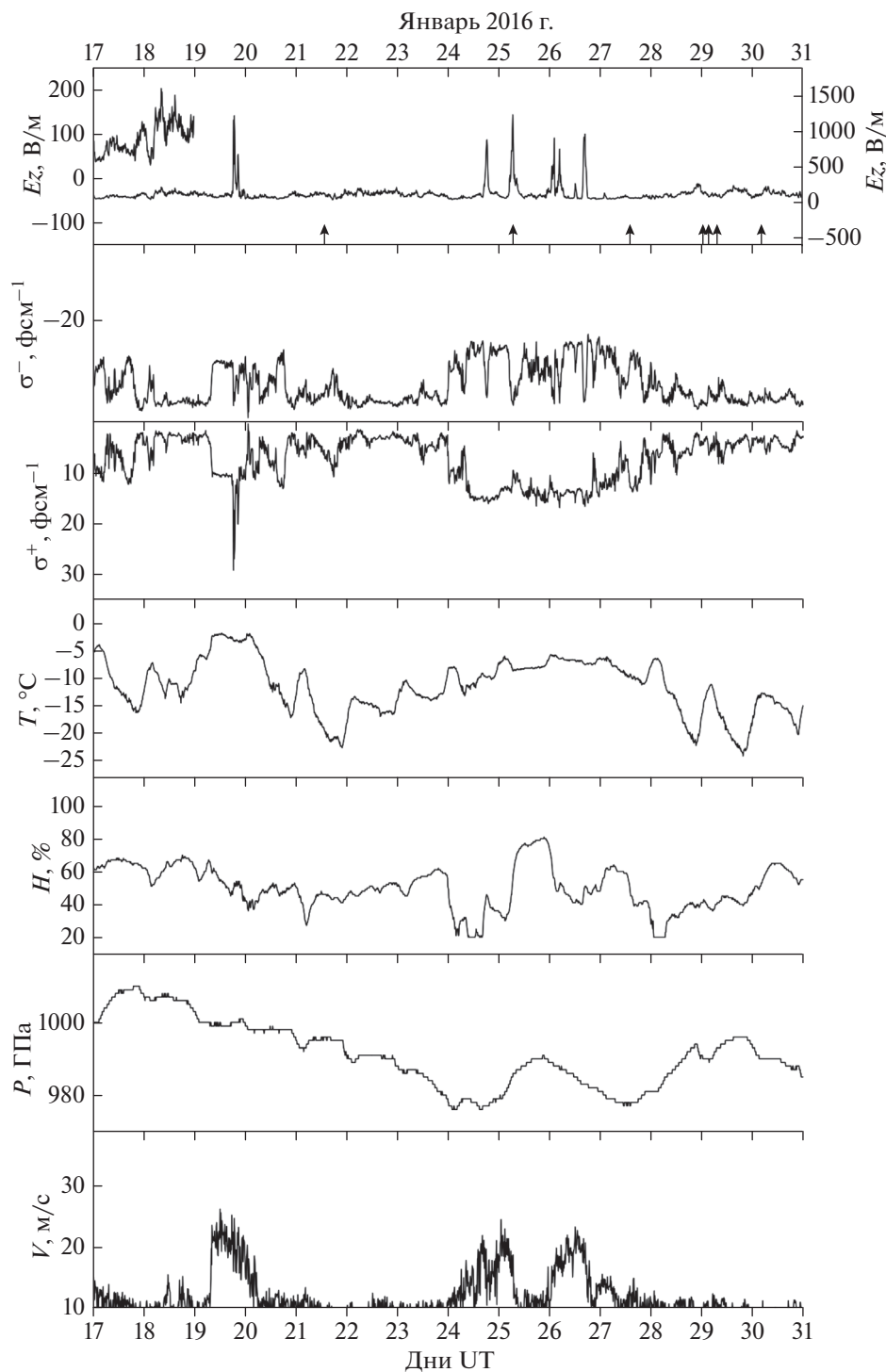


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но перед землетрясением 30 января 2016 г.

полагается под поверхностью. Интенсивность его и продолжительность действия зависят от магнитуды и глубины землетрясения [Rawat et al., 2011]. Наиболее эффективно его действие проявляется при сильных землетрясениях с магнитудой $M > 7$. Влияние этого источника должно проявляться и при более слабых землетрясениях, под действием

которого усиливается поток подпочвенного радона и отражается в увеличении электропроводности и возникновении аномального электрического сигнала первого типа [Riggio and Santulin, 2015]. Процесс усиления потоков радиоактивных газов был обнаружен также при сильном землетрясении [Руленко и Кузьмин, 2013], но его влияние, по-

видимому, подавляется более сильными процессами образования кучево-дождевых облаков.

Как видно на рис. 1–4, источник аномального роста теплового излучения включается преимущественно в ночное местное время, ближе к восходу Солнца, т.е. во время отсутствия солнечного источника инфракрасного теплового излучения. Однако природа этой тепловой аномалии и привязка к ночному времени до сих пор не ясна. Существует несколько возможных сценариев этого процесса (см., например, [Pulinets et al., 2006]), обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

Таким образом, анализ суточных вариаций электрических и метеорологических величин, измеренных одновременно перед сильными землетрясениями с детальностью в 10 мин, впервые позволил исследовать тонкие процессы в приземной атмосфере земли при аномалии температуры. Более того, при слабом потоке естественного теплового излучения в эти сезоны года наблюдаемую динамику электрических и метеорологических процессов, по-видимому, можно объяснить появлением дополнительного источника теплового излучения сейсмической природы. Для завершения картины этих процессов целесообразно в будущем проанализировать записи потоков радиоактивных газов, а также записи уходящего инфракрасного излучения при пролете спутников над Камчаткой во время рассмотренных нами землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 годах // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. № 1. С. 79–85. 2012.
- Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН. Т. 301. № 1. С. 67–69. 1988.
- Милькис Б.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 3. С. 36–47. 1986.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 6. С. 839–852. 2006.
- 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.
- РД 52.04.168–2001. Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 23 с. 2002.
- Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г., $M = 7.0$ // ДАН. Т. 348. № 6. С. 814–816. 1996.
- Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканонология и сейсмология. № 4. С. 57–68. 2000.
- Руленко О.П., Кузьмин Ю.Я. Увеличение объемной активности радона и торона на Камчатке перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Тр. VI Междунар. конф. “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений” 9–13 сентября 2013, Паратунка. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 430–434. 2013.
- Сальман А.Г., Тронин А.А. Вариации потока уходящего инфракрасного излучения Земли в сейсмоактивных регионах Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 7. С. 67–69. 1990.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979.
- Dunajevska M.A., Pulinets S.A. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico // Atmosfera. V. 18. № 4. P. 235–247. 2005.
- Hao J. The anomalous of atmospheric electric field at the ground level and earthquakes // Acta Seismol. Sin. V. 10. № 2. P. 207–212. 1988.
- Kondo G. The variation of the atmosphere electric field at the time of earthquake // Memoirs of the Kokioka magnetic observatory. V. 13. № 1. P. 11–23. 1986.
- Ouzounov D., Bryant N., Logan Th., Pulinets S., Taylor P. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999–2003 // Phys. Chem. Earth. V. 31. P. 154–163. 2006.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing long-wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. V. 431(1–4). P. 211–220. 2007.
- Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction // J. Geophys. Lett. V. 3. № 3. P. 185–188. 1976.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. V. 31. P. 143–153. 2006.
- Rawat V., Saraf A.K., Sharma K., Shujat Y. Anomalous land surface temperature and outgoing long-wave radiation observations prior earthquakes in India and Romania // Nat. Hazards. V. 59. P. 33–46. 2011.
- Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. V. 56. № 2. P. 95–114. 2015.
- Silva H., Bezzeghoud M., Reis A., Rosa R., Tlemcani M., Araujo A., Serrano C., Borges J., Caldeira B., Biagi P. Atmospheric electrical field decrease during the $M = 4.1$ Sousel earthquake (Portugal) // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 11. P. 987–991. 2011.
- Smirnov S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 8. P. 745–749. 2008.
- Tronin A., Hayakawa M., Molchanov O. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // J. Geodynamic. V. 33. P. 519–534. 2002.
- Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.V., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // Physics and Chemistry of the Earth. V. 29. P. 501–506. 2004.