

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА КАМЧАТКЕ И ИХ СВЯЗЬ С ПОТОКАМИ УХОДЯЩЕГО ОТ ЗЕМЛИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2018 г. Г. А. Михайлова¹, О. В. Капустина¹, Ю. М. Михайлов^{1, *}, С. Э. Смирнов^{2, **}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка (Камчатский край), Россия

*e-mail: yumikh@izmiran.ru

**e-mail: sergey@ikir.ru

Поступила в редакцию 25.05.2017 г.

После доработки 20.03.2018 г.

Выполнен анализ вариаций температуры приземной атмосферы на Камчатке в obs. Паратунка и потоков уходящего от земли инфракрасного излучения перед сильными Курильскими землетрясениями: 15 ноября 2006 г., $M = 8.3$; 13 января 2007 г., $M = 8.1$. Показано, что потоки излучения на уровне земли, измеренные на спутниках над эпицентром землетрясений и над удаленной обсерваторией, совпадают между собой и по величине, и по характеру изменения их во времени. Температура, измеренная непосредственно в обсерватории, и температура на уровне земли, оцененная по результатам спутниковых наблюдений, различаются по величине, но совпадают между собой по характеру изменения во времени. Обнаруженный рост температуры, вопреки отрицательному регулярному тренду в это время года, вызван включением дополнительного источника тепла, поступающего в приземную атмосферу. Этот результат в совокупности с результатами исследований вариаций различных геофизических величин перед сильными землетрясениями, ранее выполненных на Камчатке, позволил сделать вывод о том, что дополнительный источник тепла находится в земной коре.

DOI: 10.1134/S0016794018040090

1. ВВЕДЕНИЕ

Необычные вариации различных геофизических величин перед сильными землетрясениями (ЗТ) с магнитудой $M \geq 7$ на Камчатке эпизодически наблюдались сравнительно давно и рассматривались в качестве прогноза ЗТ. Так, вариации квазистатического электрического поля необычного вида были зарегистрированы за несколько суток до ЗТ 13 ноября 1993 г., $M = 7.0$ [Руленко и др., 1996]; 5 декабря 1997 г., $M = 7.7$ [Бузевич и др., 1998]; 15 ноября 2006 г., $M = 8.3$; 13 января 2007 г., $M = 8.1$; 30 января 2016 г., $M = 7.2$ [Смирнов и др., 2017]. Временная форма этих сигналов представляет собой колебания большой интенсивности, характерные для условий локальной грозовой активности [Smirnov, 2008; Михайлова и др., 2010]. В этих работах отмечалось также усиление естественного электромагнитного излучения импульсного характера на частотах $f = 1.2$ кГц [Руленко и др., 1996]; $f = 0.6$ кГц [Бузевич и др., 1998]; $f = 0.45$ кГц [Гаврилов и др., 2007], вызванного локальной грозовой активностью. Накануне земле-

трясений 5 декабря 1997 г., $M = 7.7$ [Бузевич и др., 1998] и 11 марта 2011 г., $M = 9$ [Руленко и Кузьмин, 2015] было обнаружено увеличение объемной активности радона и торона в подпочвенном газе и в воздухе у поверхности земли. Аномальные явления наблюдались также в гидродинамических процессах. Так, перед землетрясением 5 декабря 1977 г. [Копылова и Болдина, 2012] в двух самоизливающихся скважинах было зарегистрировано понижение уровней подземных вод. С учетом данных GPS-станций было показано, что эффект вызван расширением объемов водоносных горных пород в процессе образования трещин. Аналогичные эффекты понижения уровней воды в скважинах были зарегистрированы также накануне землетрясений 21 июня 1996 г., $M = 7.0$ [Gropin et al., 2004], 15 ноября 2006 г. $M = 8.3$ [Гаврилов и др., 2007] и перед серией сильных ЗТ [Копылова и Серафимова, 2007].

Особого внимания заслуживают вариации метеорологических величин (температура, давление, влажность воздуха и скорость ветра), кото-

рые оказывают непосредственное влияние на электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере. Так, в работе [Бузевич и др., 1998] по трехчасовым значениям этих величин, зарегистрированных на местной метеостанции, за две недели до ЗТ было отмечено резкое повышение температуры атмосферы до $T \sim 0^\circ\text{C}$ (при среднем сезонном уровне, равном минус $15\text{--}18^\circ$) и выпадение обильных осадков. Поскольку эти процессы развивались на фоне мощной хромосферной вспышки, авторы полагали, что именно ее действие привело к перераспределению глобальной атмосферной циркуляции и усилению циклонической деятельности. В другом случае [Руленко и Кузьмин, 2015] накануне сильного ЗТ наблюдался высокий уровень температуры, влажности и сильные вариации атмосферного давления, которые авторы связали с прохождением циклона.

В одновременных измерениях температуры воздуха, температуры и скорости потока воды в скважинах перед ЗТ 21 июня 1996 г., $M = 7.0$ [Gronin et al., 2004] за две недели до него температура воды постепенно возросла, достигла максимума накануне и резко понизилась до исходного уровня в момент ЗТ. В течение этого времени скорость потока воды изменилась незначительно, но резко возросла в момент ЗТ. Характер изменения температуры воды совпал с тепловой аномалией атмосферы на земной поверхности, оцененной по измерениям на спутнике потоков инфракрасного излучения.

Более полные исследования вариаций электрических и метеорологических величин на Камчатке накануне сильных ЗТ выполнены в работе [Смирнов и др., 2017]. Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена детальному изучению особенностей вариаций температуры и их связи с вариациями потоков уходящего от земли инфракрасного излучения, измеренных на метеорологических спутниках.

2. ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Ниже рассмотрены суточные вариации температуры приземной атмосферы, измеренные цифровой метеостанцией WS-2000 с дискретностью по времени 10 мин в обс. Паратунка ДВО РАН ($\varphi = 52.97^\circ\text{N}$; $\lambda = 158.25^\circ\text{E}$) накануне двух сильных Курильских землетрясений с магнитудой $M > 8$ в 2006 и 2007 гг.

Для сравнения этих величин с потоками уходящего от земли теплового (инфракрасного) излучения использованы данные, полученные в NOAA, Earth System Research Laboratory (ESRL), Physical Sciences Division (psd) [https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html].

Примеры графических изображений среднесуточных величин потока излучения и температуры на уровне земли в диапазоне широт $40\text{--}60^\circ\text{N}$ и долгот $150\text{--}160^\circ\text{E}$ показаны на рис. 1а и б соответственно. Известно, что регистрируемое на метеорологических спутниках тепловое излучение включает в себя тепловой поток, поступающий непосредственно от земли, от нижних слоев атмосферы и от облаков. Пространственные и временные вариации этого излучения и представляют наибольший интерес для его связи с сейсмической активностью. Для этой цели нами с графиков, показанных на рисунках, для каждого дня были считаны величины потоков и температуры в эпицентрах ЗТ и в удаленной от них обсерватории. Ниже детально рассмотрена связь этих величин с вариациями температуры, непосредственно измеренной в обс. Паратунка.

1. Землетрясение 15 ноября 2006 г.: $t = 11:14\text{ UT}$; $M = 8.3$; $h = 30.3\text{ км}$; $\varphi = 46.614^\circ\text{N}$; $\lambda = 153.23^\circ\text{E}$ ($R = 10^{0.43M} = 3707\text{ км}$; $r \sim 800\text{ км}$, где R — радиус сейсмически активной зоны в земной коре накануне ЗТ [Dobrovolsky et al., 1979]; r — расстояние от обсерватории до эпицентра). Эпицентр был расположен на островном склоне центральной зоны Курило-Камчатского желоба в 170 км от о-ва Симушир Курильской гряды. Как показано на рис. 2а, потоки излучения, измеренные в эпицентре (точки) и в обсерватории (крестики), как по величине, так и по форме временных вариаций, несмотря на их разнесение в пространстве, совпадают между собой. Этот результат указывает на большой пространственный масштаб явления, подтверждая тем самым выводы работы [Dobrovolsky et al., 1979]. На фрагменте рисунка (б) приведены суточные вариации температуры в обсерватории, измеренные с дискретностью по времени $\Delta t = 10\text{ мин}$ (кривая 1), среднесуточные величины в ноябре месяце (усредненные за 2009–2016 гг., кривая 3) и среднесуточные величины на уровне земли (кривая 2), оцененные по спутниковым данным. Как видно, на кривой 1 в период со 2 по 7 ноября в условиях “хорошей погоды” (см. Смирнов и др. [2017]) наблюдается регулярный суточный ход с максимумом в местный полдень (01:30 UT) и минимумом перед восходом Солнца. В день 7 ноября этот суточный ход начал нарушаться, и далее вплоть до 16 ноября (момента главного толчка ЗТ) температура последовательно возрастала от 0°C до 6°C , вопреки отрицательному тренду в это время года [www.gismeteo.ru]. Наблюдаемый положительный тренд температуры в этот период, по-видимому, вызван включением дополнительного источника тепла, который продолжал действовать некоторое время и после ЗТ 16 ноября. Затем в приземной атмосфере установились условия “хорошей погоды”. Одновременно подобный положительный тренд наблюдался также в величинах температуры, оценен-

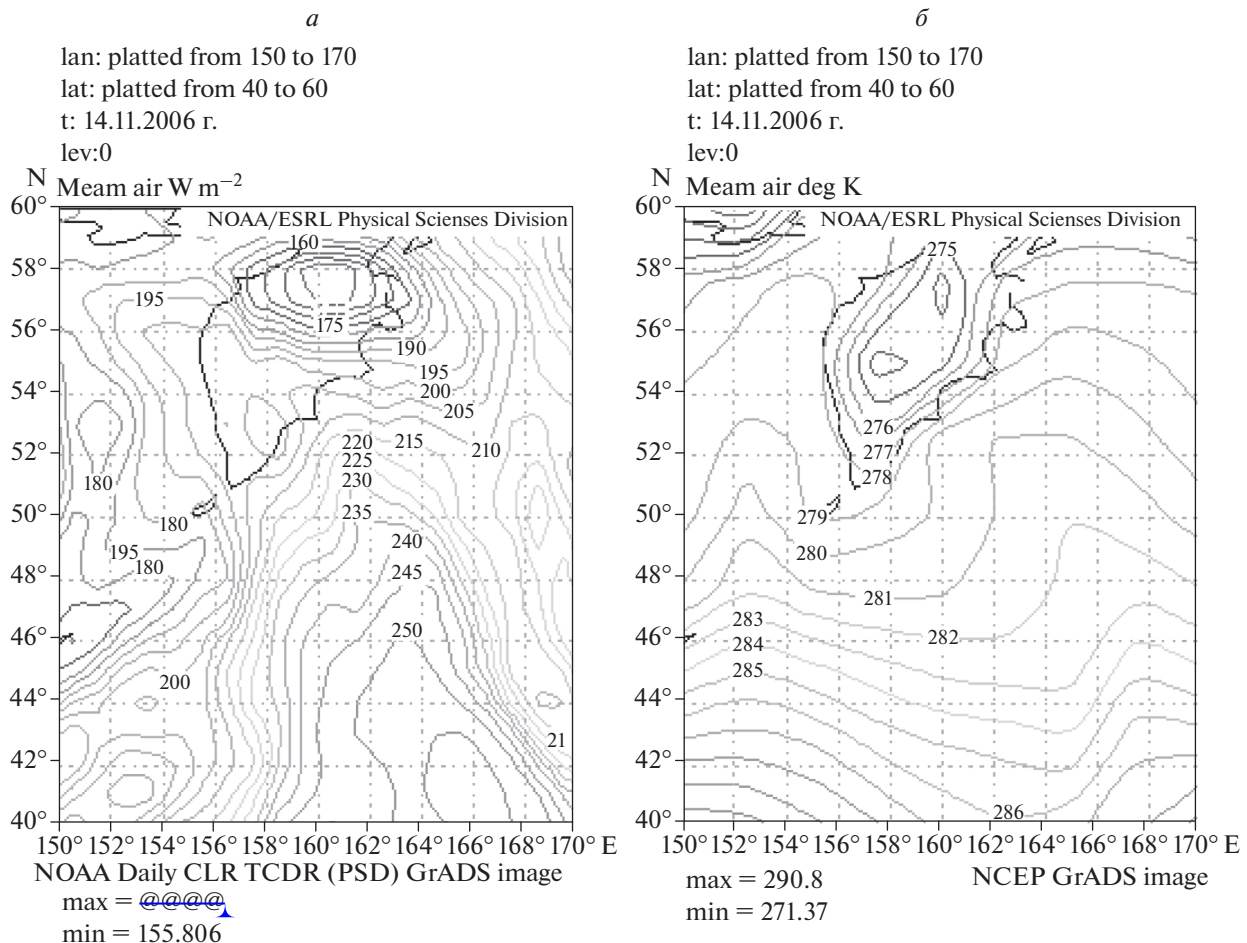


Рис. 1. Среднесуточная величина потока уходящего инфракрасного излучения (а) и температуры (б) вблизи поверхности земли в диапазоне широт 40–60° N и долгот 150–160° E над эпицентром землетрясений и над обс. Паратунка.

ных на уровне обсерватории со спутников (кривая 2).

2. Землетрясение 13 января 2007 г.: $t = 04:23$ UT; $M = 8.1$; $h = 10$ км; $\varphi = 46.48^\circ$ N, $\lambda = 154.07^\circ$ E ($R = 3041$ км; $r \sim 850$ км). На рисунке 3 приведена последовательность графиков, аналогичных графикам на рис. 2. Поток уходящего инфракрасного излучения в эпицентре (точки) и в обсерватории (крестики) совпадают между собой и по величине, и по характеру изменения во времени, но отличаются от предыдущего случая. Вариации температуры в этой комбинации величин (кривые 1 и 2) также близки по характеру изменения во времени. В дни 3 и 4 января в атмосфере сохранялись условия “хорошей погоды” с регулярным суточным ходом температуры от -15°C в максимуме до -27°C в минимуме. В день 5 января включился дополнительный источник тепла, который действовал вплоть до 13 января. В результате температура возросла до -10°C и далее достигла максимума 0°C за шесть дней до землетрясения. В отличие от предыдущего случая, изменения

температуры были менее регулярными во времени относительно среднесуточной кривой, оцененной за период 2009–2017 гг.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полуостров Камчатка имеет свои характерные особенности геологической структуры: высокая сейсмическая активность, наличие действующих вулканов и геотермальных источников. Именно на этом фоне протекали рассмотренные нами процессы. Анализ временных вариаций температуры и влажности атмосферы показал, что за несколько дней перед сильными землетрясениями включился дополнительный источник тепла. Он существенно изменил их регулярный суточный ход: на протяжении периода возрастания температуры одновременно сохранялась высокая влажность атмосферы, вопреки ее регулярному суточному ходу [Смирнов и др., 2017]. В результате в приземной атмосфере сформировались условия локальной грозовой активности, которая прояви-

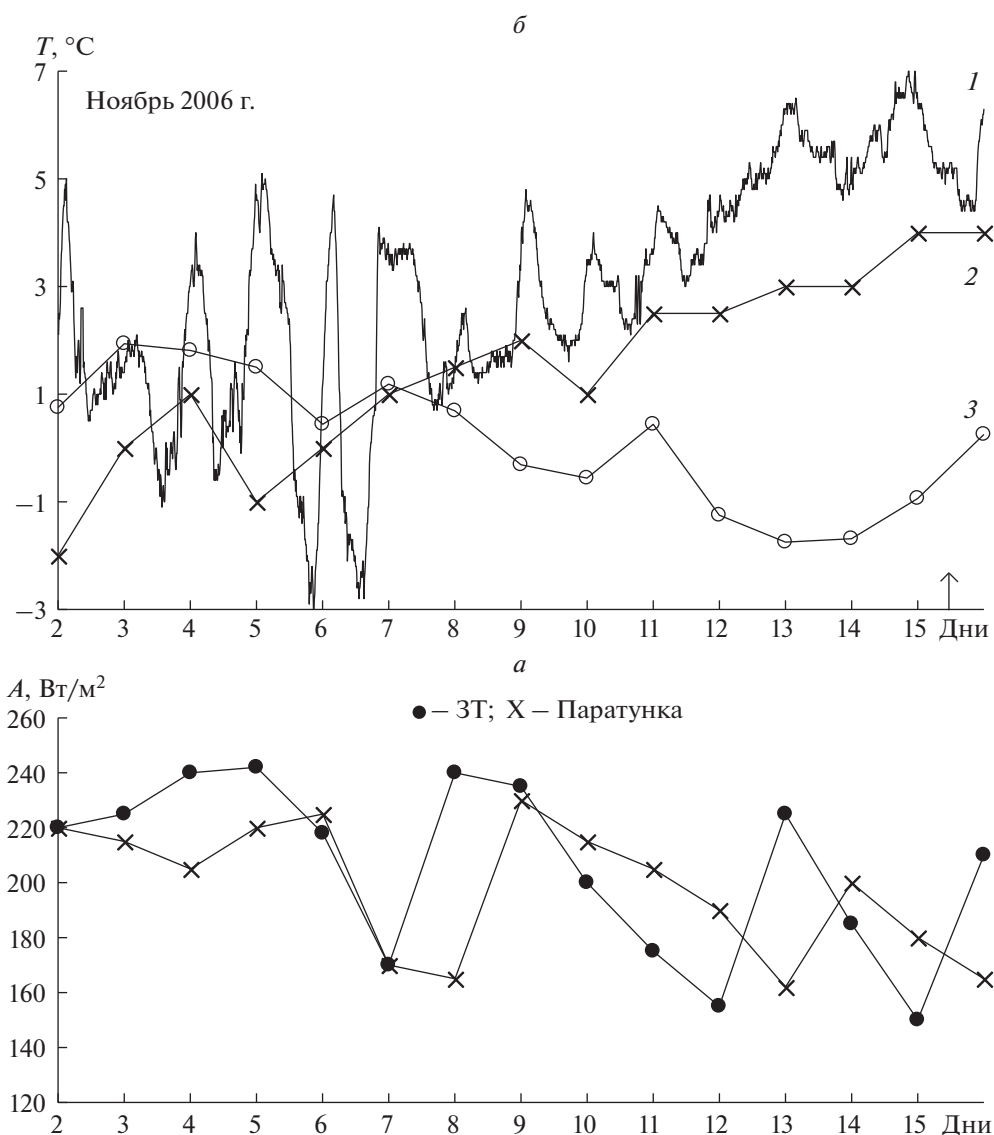


Рис. 2. Землетрясение 15 ноября 2006 г. Среднесуточные величины потоков уходящего инфракрасного излучения, измеренные над эпицентром землетрясения и над обсерваторией (а), и вариации температуры (б), измеренные в обсерватории (1), оцененные по спутниковым данным (2) и среднесуточные величины, усредненные за период 2009–2016 гг. (3). Стрелкой указан момент землетрясения.

лась во временных вариациях квазистатического электрического поля и в усилении естественного электромагнитного излучения импульсного характера в диапазоне крайне низкочастотных волн (см. ссылки во Введении). Однако для возбуждения грозовых процессов в ноябре и январе естественной тепловой энергии, поступающей от Солнца, явно недостаточно. Поэтому необходимо присутствие дополнительного источника тепла. Этим источником могут быть циклоны, которые, как известно, несут теплые воздушные массы и плотную облачность и при столкновении с массой холодного воздуха могут вызвать фронтальные грозы. В нашем случае имели место ло-

кальные грозы. Более того, в процессе развития циклона наблюдаются отрицательные тренды давления и температуры приземной атмосферы [Матвеев, 1965]. В нашем случае, как показано в работе [Смирнов и др., 2017], наоборот, наблюдался положительный тренд температуры при довольно устойчивом давлении, за исключением кратковременных его скачков, вызванных грозовой активностью. Это различие характеров протекающих процессов с учетом привязки их времени к моменту ЗТ позволило нам в рассмотренных случаях отклонить циклоническую природу дополнительного источника тепла в приземной атмосфере.

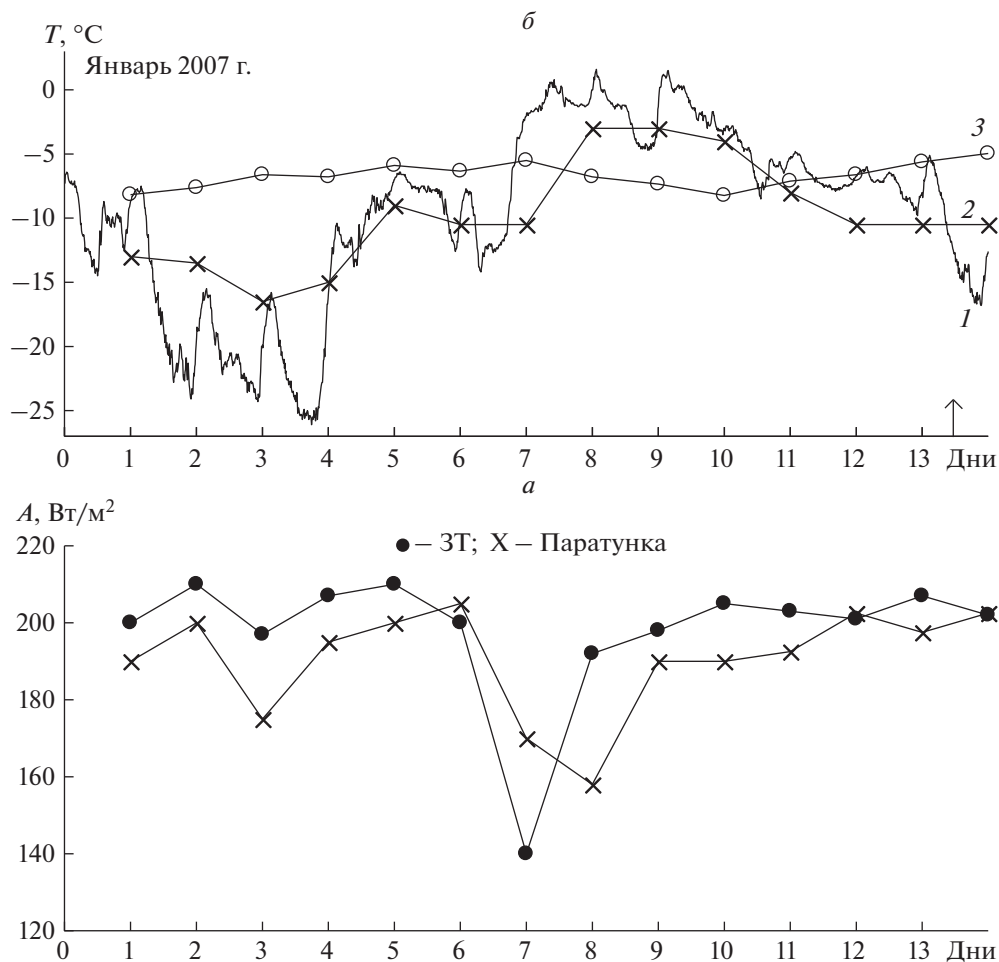


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для землетрясения 13 января 2007 г.

В развитие предположения об иной природе дополнительного источника тепла особого внимания заслуживают результаты исследований гидрофизических явлений перед сильными землетрясениями, выполненных на Камчатке. Так сложилось, что именно перед землетрясением 15 ноября 2006 г. в обс. Карымшино (в 20 км южнее обс. Паратунка) [Гаврилов и др., 2007] были выполнены измерения уровня и плотности воды в скважине. За две недели до ЗТ было обнаружено понижение этих величин. Подобный эффект отмечался также в других работах (см. Введение). Этот результат свидетельствует об активном образовании трещин и расширении объемов водоносных слоев горных пород. Понижение плотности воды авторы связывали с ростом ее температуры. Действительно, рост температуры воды в скважине ранее был обнаружен Tronin et al. [2004] за две недели до сильного землетрясения. Кроме того, накануне сильных ЗТ наблюдалось увеличение объемной активности радиоактивных составляющих в почвенном газе [Бузевич и др., 1998], а также одновременно в почвенном газе

и в воздухе у поверхности земли [Руленко и Кузьмин, 2015]. Рост температуры подземных вод и усиление конвекции радиоактивных газов свидетельствуют о выделении тепла в глубине земли при активном образовании трещин.

Таким образом, анализ всей совокупности результатов исследований особенностей вариаций различных геофизических величин перед сильными ЗТ на Камчатке позволил нам сделать вывод, что дополнительный источник тепла, обнаруженный на примере двух землетрясений, сосредоточен в земной коре. Однако, механизм этих изменений температуры накануне землетрясений до сих пор не ясен. В литературе предложено несколько его возможных моделей. Например, в работах [Geng et al., 1998; Tronin et al., 2004; Freund et al., 2007] предполагается, что рост подземной температуры связан с сильным тектоническим давлением при активном образовании трещин в горных породах. Вместе с тем, в механизме, предложенном в работе [Pulinets et al., 2006], исключается источник в земной коре и предполага-

ется, что дополнительное тепло выделяется непосредственно в атмосфере. Критический анализ предложенных механизмов, возможно, неполный, выходит за рамки статьи.

В заключение авторы благодарят Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado за возможность использования данных, приведенных на Web сайте [https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузевич А.В., Дружин Г.И., Фирстов П.П. и др. Гелиогеофизические эффекты, предвещающие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г., $M = 7.7$ // Петропавловск-Камчатский: изд-во Камчатской Гос. Академии рыбопромыслового флота. С. 177–188. 1998.
- Гаврилов В.А., Дружин Г.И., Полтавцева Е.В. Результаты одновременных измерений естественных электромагнитных СНЧ – ОНЧ-излучений с использованием подземной и наземной антенн // IV Междунар. конф. “Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений” 14–17 августа 2007 г. с. Паратунка, Камчатский край. Тр. конф. Петропавловск-Камчатский: РАН, ИКИР ДВО РАН. С. 14–19. 2007.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. $M = 7.8$ // Тихоокеанская геология. Т. 31. № 5. С. 104–114. 2012.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. О проявлении некоторых среднесрочных предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2004 гг. / Геофиз. исслед. Т. 10. № 4. С. 17–33. 2009.
- Матвеев А.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы Л.: Метеоиздательство. 876 с. 1965.
- 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.
- 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., Кузьмин Ю.Д. Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермической системы южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. № 5. С. 36–42. 2015.
- Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В. Эффекты сильных землетрясений в вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 67. № 5. С. 656–663. 2017.
- 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.
- Freund F.T., Takeuchi A., Lau B.W.S. et al. Stimulated infrared emission from rocks: assessing a stress indicator // eEarth V. 2. P. 1–10. 2007.
- Geng N.G., Yu P., Deng M.D. The simulated experimental studies on cause of thermal infrared precursor of earthquake // Acta Geoscientia Sinica. V. 18. P. 83–88. 1998.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes // Phys. Chem. Earth. V. 31. P. 143–153. 2006.
- 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.A., Biagi P.F., Molchanov J.F., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // Phys. Chem. Earth. Part A/B/C. V. 29. P. 501–506. 2004.