

УДК 551.507:550.34

Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников Земли

В.Б. Кашкин*, **А.А. Романов,**
А.С. Григорьев, А.А. Баскова
*Сибирский федеральный университет
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 4.04.2012, received in revised form 11.04.2012, accepted 18.04.2012

В работе приведены результаты анализа параметров вертикальных профилей атмосферы по спутниковым данным над территорией, где произошли крупные сейсмически-активные события. Подробно представлены основные параметры анализируемых данных, кратко описаны основные характеристики землетрясений. Впервые выявлены тропосферные эффекты, проявляющиеся в преддверии крупных землетрясений, которые могут быть использованы для кратковременных прогнозов сейсмических событий.

Ключевые слова: тропосферные эффекты, профили атмосферы, спутниковые данные, прогноз землетрясений.

Введение

Атмосфера является чувствительным индикатором различных возмущений на поверхности и в недрах Земли, например, таких как сильные подземные и наземные взрывы, извержения вулканов, землетрясения, сейши, волны цунами и др. Атмосферные отклики землетрясений представляют самостоятельный интерес, но ещё более интересны они с точки зрения поиска предвестников для прогноза места, времени и силы крупных землетрясений.

В настоящей работе проанализированы спутниковые данные о состоянии вертикальных профилей атмосферы над точками Земли, где были зафиксированы серьезные сейсмические события (Тува, 2011 и 2012 гг.). Представленные результаты служат продолжением серии ретропрогнозов; до этого были исследованы материалы по Алтайскому и Чилийскому землетрясениям, произошедшим в 2003 и 2010 гг. соответственно [1, 2]. Общей целью проводимых исследований выступает выявление эффективности использования данных спутниковых систем космического базирования для совершенствования прогнозных моделей сейсмической активности.

* Corresponding author E-mail address: rtcvbk@rambler.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

Влияние сейсмических событий на атмосферу

Считается, что наиболее вероятным механизмом распространения возмущения от сейсмических источников в верхнюю атмосферу являются инфразвуковые колебания в атмосфере – акустико-гравитационные волны (АГВ) [3-5]. При этом для инфразвука характерно малое поглощение в различных средах, вследствие чего инфразвуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на далекие расстояния. Например, поглощение энергии инфразвуковых колебаний с частотой 0,1 Гц в нижних слоях атмосферы составляет всего $2 \cdot 10^{-9}$ дБ/км [6].

В сейсмически активных регионах с ярко выраженным блоковым строением земной коры при подготовке и при возникновении землетрясения возбуждаются интенсивные сейсмогравитационные колебания, имеющие период 1-3 ч и более. Воздействуя на атмосферу подобно поршню большой площади, эти колебания способны генерировать инфразвуковые колебания [3, 4]. Рисунок 1 иллюстрирует поршневой эффект колеблющихся литосферных плит, который может вызывать повышение давления в атмосфере над очагом землетрясения. При прохождении АГВ через границу раздела слоев атмосферы возникает интересное явление – генерируются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Аналогичные волны встречаются в стратифицированных водах океанов, морей и крупных озер [7, 8].

Объяснить происхождение ВГВ в атмосфере проще всего по аналогии с волнами в океане, в котором на границе вода-воздух существуют обычные поверхностные волны, возбуждаемые ветром.

Океан стратифицирован – в нем температура воды и её солёность изменяются по глубине. Пусть поверхностная волна в океане над границей раздела вод совершает колебательные движения (рис. 2). Вода слабо сжимаема в силу сохранения гидростатического равновесия там, где гребень поверхностной волны, под границей раздела давление уменьшается; там, где её подошва, давление увеличивается, т.е. возникает колебательное движение частиц воды. Это колебательное движение как раз и представляет собой внутреннюю гравитационную волну.

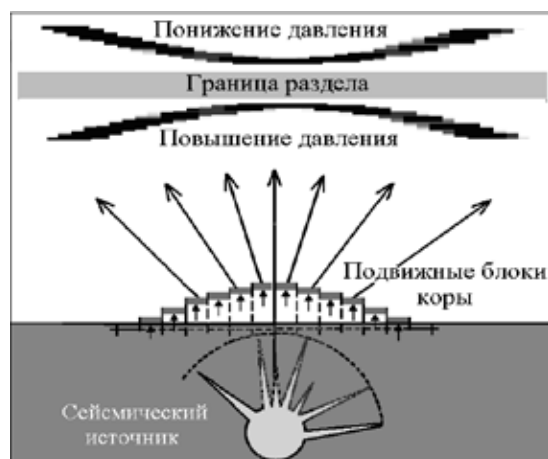


Рис. 1. Поршневой эффект колеблющихся литосферных плит, способный вызывать повышение давления в атмосфере над очагом землетрясения

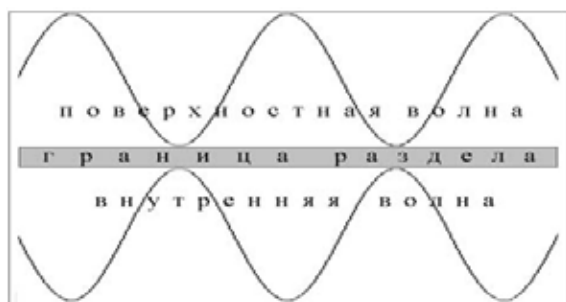


Рис. 2. Возбуждение внутренней гравитационной волны в океане

Таким образом, поверхностная волна и ВГВ движутся в противофазе. Наличие выбросов, направленных по вертикали в противоположные стороны, является характерным признаком того, что стратифицированная среда подверглась воздействию некоторой силы.

Как и океан, атмосфера Земли стратифицирована. Тропосфера имеет слоистую структуру с характерными границами раздела. В тропосфере температура в целом уменьшается с высотой приблизительно до 20 км, далее в стратосфере температура, наоборот, растет с высотой. Между тропосферой и стратосферой находится заметная граница – слой с минимальной температурой (тропопауза). В атмосфере под воздействием акустических гравитационных волн вблизи границ раздела слоев могут возбуждаться волны, которые по-прежнему называют внутренними гравитационными, хотя они внешние по отношению к движущимся от поверхности Земли акустическим волнам (рис. 1).

Генерация ВГВ в период землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. магнитудой $M=8,8$ с регистрацией характерных противофазных изменений температуры на изобарических уровнях ниже и выше границы раздела впервые описана нами в [1]. Фактически изменяется давление, но регистрируется температура, которая привязана к изобарическим уровням.

Однако влияние сейсмической активности на АГВ не сводится только к поршневому эффекту колеблющихся литосферных плит. Другой возможный механизм связан с выделением литосферных газов (CH_4 , CO_2 , NO , NO_2) непосредственно перед землетрясениями в местах разломов земной коры. Поток этих газов отличается нестабильностью и может генерировать АГВ, имея характерное время пульсаций 1-3 ч. Поток газов увеличивается во время подготовки землетрясений [3].

Кроме этого, в зонах повышенной сейсмической активности возникают тепловые аномалии, также связанные с интенсивным выделением литосферных газов из разломов. За несколько суток до землетрясений наблюдается совпадение активизации тепловых аномалий и сейсмической активности блоков земной коры, сопредельных с этими разломами. Нестационарные потоки уходящего от Земли инфракрасного излучения могут вызвать АГВ. Такие потоки возникают, как правило, в месте пересечения разломов, имеют время жизни 2-10 дней и площадь 10^4 м^2 [3]. Инфразвуковые колебания влияют на скорость перемещения флюидов, теллурические электрические поля и на локальные сейсмические колебания, поэтому в процессе подготовки крупных землетрясений происходит взаимообмен колебательной энергией между литосферой и атмосферой. При этом необходимо отметить, что тепловые аномалии на поверх-

ности суши могут быть вызваны также и другими явлениями, например массовыми лесными пожарами.

Описание данных

Современные технологии наблюдения Земли из космоса не только дают возможность исследовать поверхность самой планеты, но и обеспечивают важной информацией о её атмосфере. В настоящей работе основным источником данных для восстановления вертикальных профилей тропосферы, а также и нижней стратосферы является сенсор ATOVS спутника NOAA (NASA, США); он позволяет собирать информацию в полосе обзора 2250 км с пространственным разрешением 20-50 км. Прием информации в СФУ осуществлялся станцией АЛИСА™. Дешифрирование телеметрической информации проводили посредством применения программного пакета AAPP (ATOVS and AVHRR Pre-processing Package) [9]. Кроме этого, использовали сведения о вертикальных профилях тропосферы по данным не только NOAA/ATOVS, но и других космических аппаратов на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе [10].

Результатом обработки телеметрической информации пакетом AAPP являются таблицы значений температуры, точки росы и геопотенциала. Принцип работы сенсора ATOVS таков, что производится привязка данных не к уровням высоты, а к изобарическим уровням. В таблице 1 приведен фрагмент данных о температуре воздуха, полученный 5.06.2010 в 04:16

Таблица 1. Значение температуры воздуха на некоторых изобарических уровнях (фрагмент)

x	y	z_2	z_3	z_4	z_5	...	z_500	z_570	z_620	z_670	z_700	z_780
46.7	117.4	263	255	249	244	...	248	255	259	264	266	273
47.4	119.9	263	254	248	244	...	249	256	261	265	268	274
47.9	121.9	264	255	248	243	...	250	257	261	266	268	274
48.3	123.5	263	255	248	244	...	251	258	262	266	269	275
48.7	124.9	264	255	248	243	...	252	259	263	267	269	274
48.9	126.2	264	255	248	243	...	252	258	262	266	269	275
49.2	127.4	264	255	248	243	...	252	258	262	266	268	273
49.4	128.5	264	255	248	242	...	253	259	262	266	268	273
49.6	129.6	264	255	248	243	...	253	259	262	266	269	273
49.8	130.7	264	254	248	242	...	253	259	262	267	269	273
50	131.8	263	254	248	243	...	253	259	262	267	269	273
50.2	132.9	264	254	248	242	...	253	259	263	267	269	274
50.3	134.1	264	254	248	242	...	253	259	263	266	268	274
50.5	135.4	264	255	248	243	...	252	258	262	266	268	273
50.7	136.8	264	255	248	243	...	252	259	263	267	269	274
50.8	138.4	264	255	249	243	...	252	259	263	266	269	273
51	140.4	265	255	248	243	...	250	256	260	264	266	271
51.2	142.8	264	255	248	243	...	250	256	259	263	265	270
47.7	116.6	262	254	248	243	...	246	254	259	265	268	277
48.4	119.2	263	255	248	244	...	248	256	260	265	268	274

Таблица 2. Профили тропосферы в точке с координатами 52° с.ш. и 96° в.д.

2011 г.	22 декабря	0:00 UTC			
Давление, гПа	Геопотенциальная высота, гпм	Температура, °С	Точка росы, °С	Направление ветра	Скорость ветра, м/с
845	1601	-18.5	-18.8	225.6	2
800	2017	-16.4	-18.1	258.9	3.8
750	2501	-17.9	-19	296.6	8.4
700	3014	-20.4	-20.5	303.9	16.1
650	3559	-23.7	-23.8	305.1	19.4
600	4138	-27.5	-27.7	301	21.3
550	4759	-31.5	-32.3	300.8	22.1
500	5426	-37.3	-37.9	299.7	23.7
450	6142	-44.1	-44.2	303	25.6
400	6921	-50.7	-50.7	308.3	26.8
350	7778	-57.3	-57.3	311.1	26.8
300	8735	-64.3	-64.3	310.5	25.1
250	9838	-67.7	-67.9	307.6	25.1
200	11186	-66.4	-66.8	309	27.3
150	12925	-67.2	-69.3	306.6	24.8
100	15340	-72	-83.4	299.2	27.7
50	19390	-74.4	-273.1	288.6	40.4
20	24713	-72	-273.1	276	52

UTC со спутника NOAA-19. Здесь в первой и второй колонках показаны координаты: x – сев. широта в градусах, y – вост. долгота в градусах; далее приведены значения температуры в К; через z обозначены изобарические уровни – от 2 гПа до 1050 гПа, всего 41 изобарический уровень.

Пример данных о вертикальных профилях тропосферы согласно [10] в точке с координатами 52° с.ш. и 96° в.д. за 22.12.2011 в 0 час UTC приведен в табл. 2. В первой колонке указано давление в гПа, во второй – геопотенциальная высота в геопотенциальных метрах (гпм), в третьей – температура в °С, в четвертой – точка росы в °С, в пятой – направление геострофического ветра в градусах и в последней – скорость геострофического ветра в м/с.

Землетрясения в Туве

27 декабря 2011 г. в Восточной Сибири, в Республике Тува (Алтае-Саянская сейсмическая область), произошло землетрясение магнитудой $M=6,6$ [11]. Отзвуки его были заметны во многих сибирских городах. Очаг Тувинского землетрясения находился на склоне хребта им. Академика В.А. Обручева (рис. 3). В таблице 3 представлены сведения об основном толчке и афтершоках в декабре – начале января 2012 г. В первой строке таблицы приведены данные о форшоке магнитудой $M=3,1$, который произошел за 2 дня до основного сейсмического события. Афтершоки продолжались и далее. Особенностью землетрясения является сравнительно небольшая глубина сейсмического очага – около 10 км.



Рис. 3. Расположение очага землетрясения 27.12.2011 в Туве (звездочка)

Таблица 3. Характеристики землетрясения в Республике Тува

Дата, время UTC	Северная широта, градусы	Восточная долгота, градусы	Магнитуда
2011/12/25, 04:33:30	51.61	91.97	3.1
2011/12/27, 15:21:56	51.83	95.92	6.6
2011/12/27, 20:19:12	51.81	96.06	4.7
2011/12/28, 00:40:33	52.01	95.68	4.7
2011/12/28, 13:54:34	51.77	96.37	4.6
2011/12/28, 15:25:42	51.70	96.00	4.6
2012/01/01, 05:23:58	51.98	96.11	3.2
2012/01/01, 11:07:20	51.99	96.15	4.2
2012/01/01, 15:25:29	51.84	95.94	3.3
2012/01/02, 02:30:54	51.80	95.95	3.8
2012/01/02, 22:29:26	51.85	95.95	3.4
2012/01/02, 22:57:09	56.43	118.21	3.3
2012/01/03, 09:00:08	51.74	95.99	3.3
2012/01/04, 13:08:11	51.68	95.92	4.6

Следующее сильное землетрясение в том же районе произошло 26 февраля 2012 г. в 06:17 UTC, магнитуда составила $M=6,5$. В этот день зарегистрированы 16 афтершоков, сильнейший с $M=3,5$ зафиксирован в 06:43.

Как и Чилийское землетрясение в феврале 2010 г., землетрясения в Туве вызвали генерацию АГВ и ВГВ в атмосфере. На рисунке 4 изображен график изменения температуры атмосферы на изобарических уровнях 400 и 200 гПа с 1 декабря 2011 г. по 8 апреля 2012 г. Перед основным толчком первого землетрясения, с 22 по 27 декабря, на уровне 400 гПа температура повысилась, а на уровне 200 гПа – понизилась. Сразу после главного толчка температура на уровне 200 гПа возросла, а на уровне 400 гПа несколько понизилась. Перед вторым землетря-



Рис. 4. График изменения температуры атмосферы на изобарических уровнях 200 и 400 гПа в эпицентральной области землетрясения в Туве

сением 16-22 февраля наблюдалась аналогичная картина. В период между землетрясениями колебания температуры продолжались. По сравнению с мощным землетрясением в Чили, величина энерговыделения землетрясений в Туве меньше на два порядка, по-видимому, этим можно объяснить менее ярко выраженные атмосферные эффекты.

В событиях конца 2011 – начала 2012 г. можно выделить несколько этапов. Первый – это относительное затишье, с 1 по 22 декабря. В этот период коэффициент корреляции между рядами температуры на изобарических уровнях 200 и 400 гПа составил $R = -0,176$, здесь трудно говорить о зависимости между температурными рядами. Начиная с 23 декабря, по-видимому, возникают сейсмические явления, вызывающие атмосферные отклики – возбуждение в противофазе акустических и внутренних гравитационных волн в тропосфере. Коэффициент корреляции между температурными рядами с 23 декабря по 8 апреля отрицательный и составил $R = -0,695$. С 3 по 29 января графики на рис. 4 почти зеркально отображают друг друга, $R = -0,92$. Таким образом, январь – период наиболее интенсивного генерирования АГВ и ВГВ во время последних землетрясений в Туве.

На рисунке 4 показано, как изменялось давление в эпицентральной области 31 декабря вблизи тропопаузы. Здесь в зоне акустической гравитационной волны произошло увеличение давления на ~ 100 гПа относительно среднего значения в 240 гПа на температурном уровне минус $50,5$ °C, АГВ возбудила внутреннюю гравитационную волну, в зоне ВГВ давление уменьшилось на ~ 100 гПа.

Данные, получаемые с искусственных спутников Земли, не только позволяют исследовать поведение атмосферы в точке, но и строить карты распределения метеорологических параметров. На рисунке 6 представлена карта распределения температуры на изобарическом уровне 300 гПа за 22 декабря 2011 г. Непосредственно перед землетрясением в эпицентральной области наблюдалась аномалия в виде «прогиба» поля температур. Черной точкой на рис. 6 обозначены координаты эпицентра землетрясения 27 декабря. Подобная аномалия может служить предвестником сейсмического события. Таким образом, допустимо полагать, что анализ спутниковых температурных карт может стать одним из методов обнаружения предвестников сильных землетрясений.

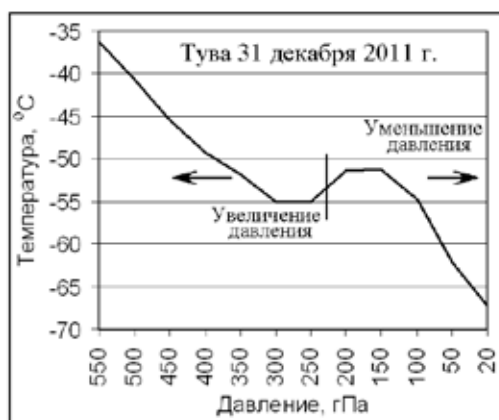


Рис. 5. Изменение давления в эпицентральной области вблизи тропопаузы

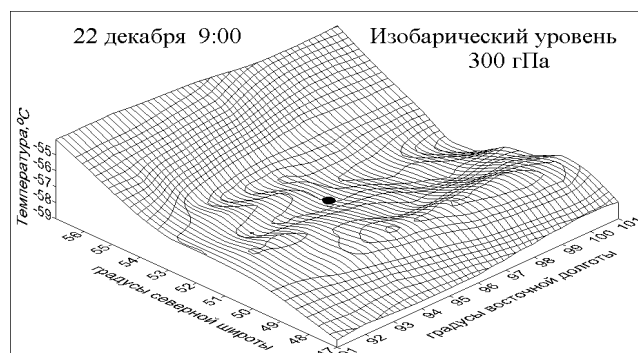


Рис. 6. Температурная аномалия на изобарическом уровне 300 гПа 22 декабря 2011 г. при землетрясении в Туве

Заключение

Представленные в работе результаты демонстрируют отдельные, но весьма характерные тропосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, которые могут быть использованы для кратковременных прогнозов крупных землетрясений совместно с другими предвестниками сейсмической опасности.

Работа поддержана в рамках тематического плана СФУ, выполняемого по аналитической ведомственной целевой программе Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (мероприятие 1).

Список литературы

- [1] Кашкин В.Б., Симонов К.С., Григорьев А.С. // Инженерная экология. 2011. № 2. С. 38-54.
- [2] Кашкин В.Б., Романов А.А. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 63-66.
- [3] Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. // Электронный журнал «Российский журнал наук о Земле». 2000. Т. 2. № 2.

[4] *Афраймович, Э.Л., Перевалова, Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ЗВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

[5] *Булатов В.В., Владимиров Ю.В.* Внутренние гравитационные волны в неоднородных средах. М.: Наука, 2005. 195 с.

[6] *Сокол Г.И., Харченко М.Е.* // Збірник наукових праць, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности. Симферополь: Крымучпедгиз, 2008. С. 86-95.

[7] *Булатов В.В., Владимиров Ю.В.* Внутренние гравитационные волны в неоднородных средах. М.: Наука, 2005. 195 с.

[8] *Булатов В.В.* Автореф. ... дис. д-ра физ.-мат. наук. М., 2009.

[9] International ATOVS Processing Package. Электронный ресурс: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>

[10] Электронный ресурс: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html>

[11] Электронный ресурс: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>

Troposphere Effects of Tuva Earthquakes Detected with Spase Technology

**Valentin B. Kashkin, Aleksey A. Romanov,
Aleksey S. Grigoriev and Anastasiya A. Baskova**
*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

In the paper the analysis of space-burn vertical pressure-temperature troposphere profiles above zones of seismic activity is presented. The description of the used data is given. New atmospheric effects appearing before earthquakes are fined out. The effects may be used for short-time earthquake prognosis.

Keywords: troposphere effects, atmosphere profiles, satellite data, earthquake prognosis.
