

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ СИЛЬНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В 2003–2014 г.г.**

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**2003-2014 ЖЫЛДАРДАГЫ КАТУУ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨР УЧУРУНДА  
АТМОСФЕРАНЫН ТЕМПЕРАТУРАСЫНЫН АНОМАЛИЯЛАРЫ**

*L.G. Sverdlik, S.A. Imashev*

**ANOMALIES OF THE TEMPERATURE ATMOSPHERE DURING STRONG  
EARTHQUAKES IN 2003–2014**

УДК 551.524:551.511/.513

*Проанализировано поведение вертикальных профилей температуры (NOAA/ATOVS), что позволило выявить временную динамику аномалий температуры атмосферы над эпицентрами сильных землетрясений ( $K \geq 13$ ), произошедших в регионе в 2003–2014 г.г.*

**Ключевые слова:** спутниковые данные, профили температуры, тропопауза, землетрясение, гравитационные волны в атмосфере, аномалии.

*Температуранын вертикалдуу профилдери (NOAA/ATOVS) анализделди. Бул 2003-2014-жылдарда региондо болуп өткөн катуу жер титирөө ( $K \geq 13$ ) эпицентрлериндеги атмосферанын температурасынын аномалияларынын динамикасын аныктоого жардам берди.*

**Негизги сөздөр:** спутник маалыматтары, температуранын профили, тропопауза, жер титирөө, атмосферадагы гравитациялык толкундар, аномалиялар.

*Vertical temperature profiles (NOAA/ATOVS) was analyzed. This made possible to reveal temporal dynamics of atmosphere temperature anomalies above epicenters of strong earthquakes ( $K \geq 13$ ), occurred in the region in 2003–2014.*

**Keywords:** satellite data, temperature profiles, tropopause, earthquake, atmosphere gravitational waves, anomalies.

**1. Введение**

Проблема надежного прогноза землетрясений остается одной из важнейших нерешенных проблем в геофизике. В последние годы выявлены многочисленные предвестники, наблюдавшиеся перед сейсмическими событиями, как на поверхности Земли, так и в атмосфере и ионосфере, однако решение этой задачи еще далеко до завершения и предполагает необходимость исследования физических особенностей всего комплекса явлений в геосферах.

Область аномального протекания гидрогеологических и атмосферных процессов по своим размерам обычно на порядок превышает область очага самого землетрясения [1], поэтому одной из современных тенденций при детектировании возмущений, связанных с литосферными процессами, является использование средств спутникового дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы, позволяющих проводить измерение различных параметров на больших площадях. Одной из ключевых характеристик, определяющих условия

протекания большинства фотохимических и динамических процессов, является термическая структура атмосферы. Несмотря на то, что атмосфера представляет собой сложный объект для наблюдения, тепловые аномалии перед сильными землетрясениями отмечались на разных уровнях, начиная от поверхности земли до верхней границы облаков, и неоднократно регистрировались многими исследователями с помощью спутников, оснащенных тепловыми датчиками, такими, как AVHRR (NOAA), MODIS (Terra / Aqua), AIRS (Aqua) [2,3].

Выполненное в рамках данной работы исследование основано на анализе вариаций профилей температуры атмосферы (ATOVS/NOAA) перед наиболее сильными землетрясениями (энергетического класса  $K > 13.0$ ), произошедшими в Центрально-Азиатском регионе, и направлено на выявление аномалий температуры на различных высотных уровнях в области тропопаузы, подразумевая их связь с процессом подготовки сейсмических событий.

**2. Данные и методология**

В опубликованных ранее работах [4,5] была предложена методика анализа изменений температуры, проявляющихся на высотах в зоне раздела тропосферы и стратосферы в период подготовки сейсмического события. Вариации разности температур  $\Delta T = T_{250hPa} - T_{70hPa}$ , наблюдаемые перед землетрясением 25.12.2006 (EQ3) были максимальными за 6–7 дней до землетрясения, постепенно снижались и достигли минимального значения за день до основного толчка, а затем увеличивались до нормального значения. Аналогичная тенденция наблюдалась перед землетрясением, произошедшим 02.03.2010 (EQ6).

Продолжая исследования в данном направлении, с целью выявления аномалий пространственного распределения температуры атмосферы были отобраны 10 наиболее сильных землетрясений, характеризующихся энергией сейсмических волн в пределах  $13.2 < K < 14.8$ , которые произошли на территории республики Кыргызстан (широта:  $39 \div 43^\circ N$ , долгота:  $71 \div 79^\circ E$ ) в 2003–2014 годах (таб.1).

Таблица 1 - Характеристики землетрясений энергетического класса  $K > 13.0$  (2003–2014 г.г.)

№	Date	Time	Latitude N	Longitude E	Dept, km	K	n
EQ1	22.05.2003	18:11:18	42–59.32	72–48.82	7.0	14.26	18
EQ2	16.01.2004	09:06:09	42–32.96	75–17.82	13.95	13.68	14
EQ3	25.12.2006	20:00:58	42–06.74	76–01.93	0.12	14.83	20
EQ4	06.06.2007	11:09:25	42–34.14	75–23.99	12.96	13.25	7
EQ5	06.10.2008	15:52:41	38–53.75	73–23.70	50.18	13.25	2
EQ6	02.03.2010	01:55:36	42–25.95	75–39.66	19.30	13.34	22
EQ7	09.04.2011	12:30:25	42–03.07	74–50.01	6.27	13.20	2
EQ8	05.02.2012	07:10:15	41–23.77	74–45.67	13.42	13.21	5
EQ9	23.11.2013	09:42:06	42–25.62	75–41.22	9.92	13.46	13
EQ10	14.11.2014	01:24:17	42–11.35	77–13.75	10.08	13.98	1

\*D, K - энергетический класс и глубина очага землетрясений (км); n – количество сейсмических толчков в течение указанных суток

На данном этапе из приведенного в таблице списка были выделены 6 событий (EQ1, EQ2, EQ3, EQ6, EQ8 и EQ9) с максимальными значениями выделившейся суммарной сейсмической энергии и дальнейший анализ был проведен для этих случаев.

В качестве исходной информации для восстановления вертикальных профилей температуры ( $T(p)$ ) использовались стандартные спутниковые данные (ATOVS/NOAA MERRA 3D). Выбранные временные интервалы составляли 25–30 дней до и 7–10 дней после каждого из рассматриваемых сейсмических событий, сведения о которых взяты в каталоге землетрясений Института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Как показала обработка результатов измерений, одной из характерных особенностей вариации температуры, привязанной к изобарическим поверхностям  $p_k=350$  hPa и  $p_m=150$  hPa, являлось то, что изменения происходили в противофазе, и это определило выбор разности температур ( $\Delta T$ ) между этими уровнями как наиболее чувствительный параметр при оценке термических изменений в атмосфере:

$$\Delta T(n, t, p) = T(t_n, p_k) - T(t_n, p_m)$$

где:  $t$  и  $n$  – время и день измерения;  $p_k$  и  $p_m$  – изобарические уровни.

Анализ временных рядов разности температур позволил выявить временную динамику аномалий над эпицентрами сильных землетрясений и то, каким образом она соотносится с сейсмической активностью. Аномалия разности температур, обозначенная индексом  $\Theta T$ , определялась для каждого пиксела ( $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ ) на соответствующих изобарических уровнях, как отклонение текущего значения  $\Delta T$  от среднемесячного уровня, нормированное на среднеквадратичное отклонение [6], а именно:

$$\Theta T(x, y, n, t, p) = \frac{\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k, p_m) - \langle \Delta T(x_i, y_j, p_k, p_m) \rangle}{\sigma_{\Delta T}(x_i, y_j)}$$

где:  $n$  – день измерения;  $t$  – время измерения ( $\Delta t = 12$  часов);  $x$  – широта,  $y$  – долгота;  $i, j$  – обращение к

точкам сетки координат ( $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ );  $\Delta T(x_i, y_j, t, p_n, p_m)$  – текущее значение разности температур, вычисленное между нижним ( $p_k$ ) и верхним ( $p_m$ ) изобарическим уровнем;  $\langle \Delta T(x_i, y_j) \rangle$  – среднее значение разности температур;  $\sigma_{\Delta T}(x_i, y_j)$  – среднеквадратическое отклонение.

Критерием аномалии  $\Theta T$  являлось превышение текущего значения разности температур  $\Delta T$  за выбранный день относительно среднемесячной величины за текущий год на уровень  $2\sigma_{\Delta T}$ .

### 3. Результаты анализа температурных изменений и сейсмических данных

Исследование потенциальных возможностей спутникового мониторинга применительно к выявлению аномалий высотного распределения температуры, как вероятных предвестников сейсмических процессов, проведено на примере наиболее сильных землетрясений, произошедших в регионе в 2003–2014 г.г.

В течение всех рассматриваемых временных периодов вертикальные распределения температуры показали общее падение температуры до уровня 250 hPa, где наблюдалось существенное локальное изменение вертикального градиента температуры. Расположение среднеширотной полярной тропопаузы оставалось достаточно устойчивым, в то время как температура тропопаузы была подвержена значительной изменчивости (порядка 10 К). Характерной особенностью областей высот выше и ниже полярной тропопаузы (200–250 hPa) являлись противофазные изменения температуры вследствие возбуждения в тропосфере акустических (АГВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ) [7], как результат высвобождения энергии, накопленной в недрах Земли, в виде сейсмических волн.

На рис. 1 показаны временные ряды температуры в слоях атмосферы 250–400 и 70–150 hPa в периоды 01–31 декабря 2006 (EQ3), с 03 февраля по 8 марта 2010 (EQ6) и 1-30 ноября 2013 (EQ9).

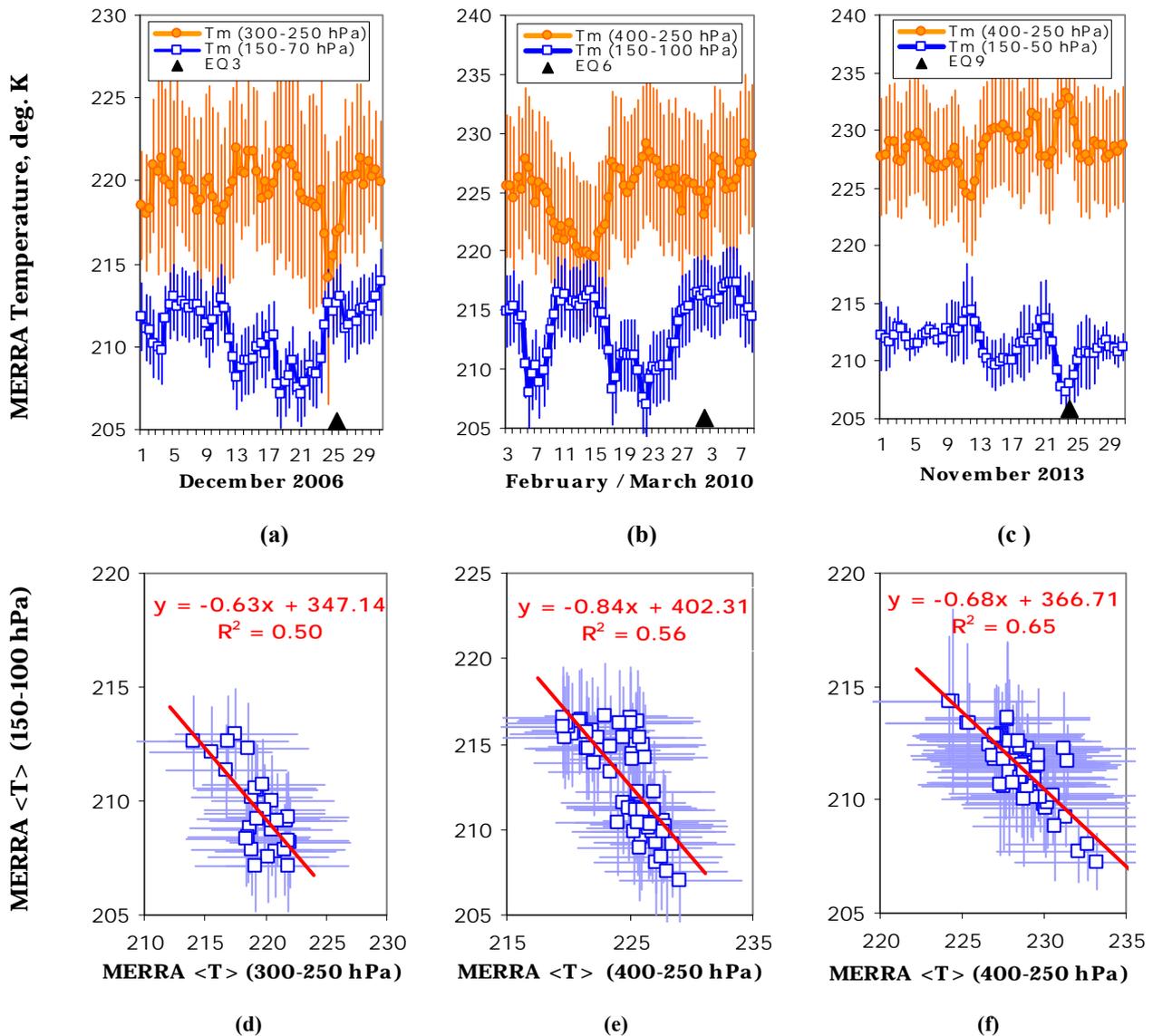


Рис. 1. Вариации температуры в слоях атмосферы: а – с 1 по 31 декабря 2006 (EQ3); б – с 3 февраля по 8 марта 2010 (EQ6); в – с 1 по 30 ноября 2013 (EQ9) и корреляционная связь между рядами  $\langle T_m \rangle$  (d, e, f).

Изменения температуры перед главным сейсмическим событием характеризовались ростом значений на уровнях 250–400 hPa и понижением на уровнях 70–150 hPa, а также значительным усилением амплитуды вариаций, что, вероятно, обусловлено более интенсивным генерированием АГВ и ВГВ в этот период. Наблюдаемый нагрев тропосферы ( $p > 250$  hPa) и охлаждение атмосферы на уровнях  $100 < p < 250$  hPa можно объяснить перераспределением энергии между атмосферными уровнями.

Коэффициенты корреляции между рядами температуры в указанных слоях достигали наибольших значений ( $R^2 > 0.5$ ) в периоды 14–18 дней до основного события (рис. 1 (d, e, f)). Это позволяет предположить, что вероятной причиной наблюдаемых аномальных вариаций температуры могла быть сейсмическая активность.

Анализ изменения аномалий разности температур над эпицентрами землетрясений показал появ-

ление положительных аномалий  $\Theta T$  за 1–3 суток до предстоящего основного сейсмического события с последующим быстрым уменьшением  $\Theta T$  до небольших отрицательных значений. Продолжительность аномалий не превышала 1–2 суток. Такой характер поведения наблюдался в 4 случаях (EQ2, EQ3, EQ8 и EQ9) из 6 исследованных событий.

В качестве примера на рис. 2 показаны 22-х дневные циклы (15 дней до и 7 дней после землетрясения  $K > 13.0$ ) развития температурных аномалий и сейсмическая активность в январе 2004, декабре 2006 и январе-феврале 2012 г. Как видно, максимумы параметра  $\Theta T$ , наблюдаемые 15-16 января 2004 г., 23 декабря 2006 г. и 03 февраля 2012 г., существенно превышали удвоенную величину стандартного отклонения  $2\sigma_{\Delta T}$ .

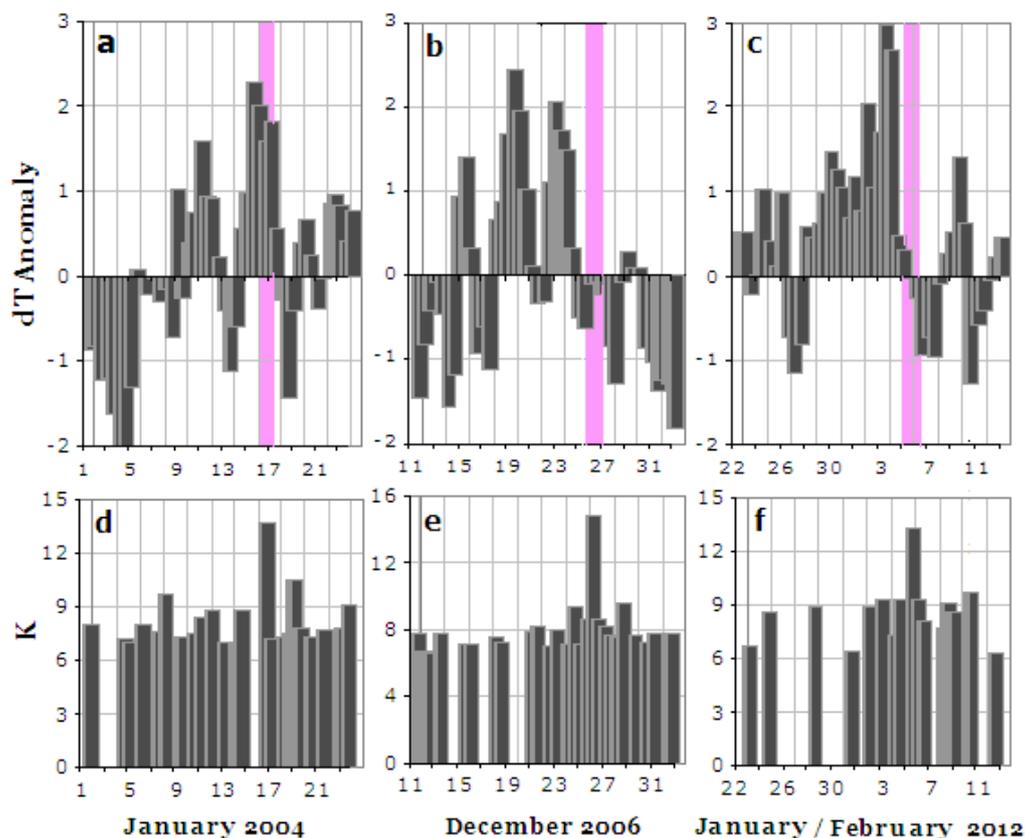


Рис. 2. Временная динамика аномалий разности температур  $\Theta T$  (a, b, c) и сейсмическая активность  $K$  (d, e, f) в январе 2004, декабре 2006 и январе-феврале 2012 г.

#### 4. Заключение

Данные спутникового дистанционного зондирования (ATOVS/NOAA) свидетельствуют о наличии связи между динамикой литосферных процессов и изменениями вертикального распределения температуры атмосферы. Среди 6 исследованных землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 13$  в 4 случаях было установлено коррелированное изменение температуры в области тропопаузы и вариации температуры отмечались в более широком диапазоне значений. Также наблюдались аномалии разности температур примерно за 1–3 дня до главного сейсмического события, в зависимости от энергетического класса и глубины очага, а затем, к моменту землетрясения, происходил резкий спад  $\Theta T$ . Во всех случаях продолжительность аномалий составляла не более 1–2 суток и существенно не отличалась.

Таким образом, почти в 70% рассмотренных случаев были обнаружены явные аномалии температуры атмосферы, которые позволяют утверждать, что атмосферные предвестники землетрясений – реально существующие явления, а разработанная методика их обнаружения предоставляет возможность практического использования для краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

Авторы выражают благодарность руководителям и сотрудникам научных проектов ATOVS/NOAA (MERRA 3D) за их усилия по обработке результатов измерений и

обеспечение свободного доступа к данным, используемым в настоящем исследовании.

#### Литература

1. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. (2008) Исследование возможности применения спутниковых навигационных систем для мониторинга сейсмических явлений. Вопросы электромеханики, Т. 105, С. 94–104.
2. Tronin A. (2010) Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review. *Remote Sens.*, 2, 124-150; doi:10.3390/rs2 010124.
3. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Боярчук К.А., Тertyshnikov A.B., Юдин И.А. (2012) Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера - атмосфера - ионосфера - магнитосфера. *Космонавтика и ракетостроение*, Т. 3, № 68, С. 21-42.
4. Имашев С.А. и Свердлик Л.Г. (2015) Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011. *Наука и новые технологии*, №1, С. 15–19.
5. Свердлик Л.Г. и Имашев С.А. (2015) Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане. *Наука и новые технологии*, №1, С. 23–27.
6. Corrado R., R.Caputo, C.Filizzola, N.Pergola, C. Pietrapertosa, and V.Tramutoli (2005) Seismically active area monitoring by robust TIR satellite techniques: a sensitivity analysis on low magnitude earthquakes in Greece and Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 101–108.
7. Кашкин В.Б., А.А. Романов, А.С. Григорьев, А.А. Баскова. (2012) Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников Земли. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2, 220-228.

Рецензент: д.ф.-м.н. Рыбин А.К.