

УДК [551.507:551.524]:550.34

## МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

*Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев*

Представлена методика выявления аномалий термической стратификации атмосферы в области тропопаузы и закономерностей их проявления над зонами высокой сейсмической активности при анализе процессов трансформации высотных профилей температуры.

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

---

## DIAGNOSTICS TECHNIQUE OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE ANOMALIES DURING SEISMIC ACTIVITY

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

Technique of revealing of thermal stratification anomalies near the tropopause and laws of their manifestation over the zones of high seismic activity is presented at the analysis of transformation processes of temperature vertical profiles.

*Keywords:* temperature anomalies; satellite data; tropopause; temperature profiles; earthquake; atmospheric gravity waves.

**Введение.** Происходящие ежегодно на Земле десятки сильных землетрясений, которые приводят к многочисленным жертвам и разрушениям, обусловили повышенное внимание к этой проблеме во всем мире. Несмотря на сложности реализации, к настоящему времени выполнено множество исследований, в которых предложены способы прогнозирования сейсмической опасности [1, 2]. Основаны они на регистрации аномального поведения различных характеристик как в земной коре и приповерхностной литосфере, так и в тропосфере и ионосфере. К числу термодинамических предвестников сильных землетрясений, наблюдаемых в атмосфере, могут быть отнесены изменения газового состава, прозрачности, температуры, влажности, уходящей длинноволновой радиации, спектра и интенсивности акустико-гравитационных волн [3, 4].

Развитие и совершенствование методов дистанционного зондирования атмосферы, и особенно спутниковых измерений, создало предпосылки для исследования изменений пространственно-временной структуры различных параметров атмосферы, в том числе температуры на различных высотных уровнях [5–8]. В настоящей работе представлена методика ретроспективного анализа результатов спутниковых измерений, позволяющая выявлять

аномальные вариации температуры в верхней тропосфере как вероятные предвестники сильных сейсмических событий. Локализация области подготовки землетрясений производилась с использованием как профилей температуры, так и независимой информации о пространственно-временном распределении уходящей длинноволновой радиации (*OLR*).

**Используемые данные.** Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы использовались данные спутниковых измерений (*MERRA 3D*) на 23-х изобарических уровнях ( $p_k$ ) от 800 *hPa* до 10 *hPa* (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Вертикальные профили температуры  $T(p_k)$  были восстановлены над каждым участком размером  $\pm 1^\circ$  от очага землетрясения для относительно продолжительных временных периодов, составляющих 60–90 дней до и 30–45 дней после каждого из рассматриваемых сейсмических событий. Выбранное время регистрации (00:00 и 12:00 *UTC*) и дискретность измерений ( $\Delta t$ ), составляющая 12 часов, позволили ослабить суточную составляющую и сохранить основные особенности временной изменчивости температуры.

Исследование потенциальных возможностей спутникового мониторинга применительно к выявлению аномалий температуры атмосферы проведено на примере 15 наиболее сильных землетрясе-

Таблица 1 – Характеристики землетрясений энергетического класса  $K > 13.0$  (2003–2015 гг.)

№	Date	Time	Latitude N	Longitude E	Dept, km	K	n
EQ01	22.05.2003	18:11:18	42-	7248.82	7.0	14.26	18
EQ02	16.01.2004	09:06:09	42-	75-	13.95	13.68	14
EQ03	02.06.2004	17:15:11	42-	74-	17.88	13.25	2
EQ04	08.11.2006	02:21:27	42-33.91	75-21.35	18.56	13.37	5
EQ05	25.12.2006	20:00:58	42-	76-	0.12	14.83	20
EQ06	06.06.2007	11:09:25	42-	75-	12.96	13.25	7
EQ07	05.10.2008	15:52:41	38-	7323.70	50.18	13.25	2
EQ08	02.03.2010	01:55:36	42-	75-	19.30	13.34	22
EQ09	18.03.2011	09:36:27	43-	74-	17.08	13.00	2
EQ10	09.04.2011	12:30:25	42-	74-	6.27	13.20	2
EQ11	05.02.2012	07:10:15	41-	74-	13.42	13.21	5
EQ12	23.11.2013	09:42:06	42-	75-	9.92	13.46	13
EQ13	14.11.2014	01:24:17	42-	77-	10.08	13.98	1
EQ14	17.11.2015	17:29:37	40-	7311.23	3.06	13.53	7
EQ15	07.12.2015	08:30:53	41-	74-	15.91	13.60	3

\* K – энергетический класс; D – глубина очага землетрясения (км); n – количество сейсмических толчков в течение указанных суток.

ний, которые произошли в регионе, ограниченном координатами  $39 \div 43 \text{ }^\circ\text{N}$ ,  $71 \div 79 \text{ }^\circ\text{E}$  в 2003–2015 гг. и характеризовались энергией сейсмических волн (K) от 13.2 до 14.8 (таблица 1).

Сведения о сейсмических событиях взяты из каталога землетрясений Института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке, составленного по данным сейсмологической сети KNET.

Дополнительно в пределах области, охватывающей всю территорию Кыргызстана ( $35.0\text{--}45.0 \text{ }^\circ\text{N}$ ;  $65.0\text{--}85.0 \text{ }^\circ\text{E}$ ), были построены карты пространственного распределения уходящей длинноволновой радиации (OLR), которая регистрируется на верхней границе атмосферы за счет выделения тепловой энергии Землей, нижними слоями атмосферы и облаками. Излучение OLR в “окне” прозрачности  $\Delta\lambda = 8.0\text{--}12.0 \text{ мкм}$  [9] не поглощается облачным покровом и может измеряться на больших высотах (16–17 км над ур. моря). В качестве исходных данных в настоящем исследовании использовались результаты измерений NOAA/ESRL OLR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/>).

**Методика анализа временных рядов температуры атмосферы.** Несмотря на некоторые специфические особенности волновых проявлений в динамике развития температурных аномалий накануне различных сейсмических событий, предлагаемая методика позволила определить основные закономерности изменения температуры, общие для большей части произошедших сильных землетрясений.

На начальном этапе были сформированы непрерывные временные ряды, содержащие значения температуры на всех высотных уровнях атмосфе-

ры, измеренные через постоянные интервалы времени ( $\Delta t = 12 \text{ ч}$ ). Временная динамика аномалий температуры ( $\Theta T$ ) рассчитывалась как отклонение текущего значения температуры от среднемесячного уровня, нормированное на среднеквадратичное отклонение, а именно:

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

где:  $n$  – день измерения;  $t$  – время измерения;  $x$  – широта,  $y$  – долгота;  $i, j$  – обращение к точкам сетки координат ( $2^\circ \times 2^\circ$ );  $T(x_i, y_j, t, p_k)$  – текущее значение температуры на каждом уровне ( $p_k$ );  $\langle T(x_i, y_j, p_k) \rangle$  – среднее значение температуры;  $\sigma_T(x_i, y_j)$  – среднеквадратическое отклонение.

На основании полученных данных вычислялись средние значения температурных аномалий в слоях атмосферы 600–300 hPa и 200–150 hPa, которые примерно соответствуют свободной тропосфере ( $\Theta T_{FT}$ ) и области, расположенной между тропической и полярной тропопаузой ( $\Theta T_{TP}$ ). Особенность и принципиальное различие теплового режима выбранных высотных интервалов заключается в том, что в первом температура всегда уменьшается с высотой ( $\gamma = \Delta T / \Delta p < 0$ ), а во втором может, как уменьшаться с более низким градиентом, так и увеличиваться ( $\gamma = \Delta T / \Delta p > 0$ ), в зависимости от динамики полярной тропопаузы (рисунок 1, а).

Нарушения стабильности земной коры и вертикальные движения твердой подстилающей поверхности, действующие как поршень на нижнюю границу атмосферы, возбуждают акустические волны, распространяющиеся в верхнюю тропосферу. Как

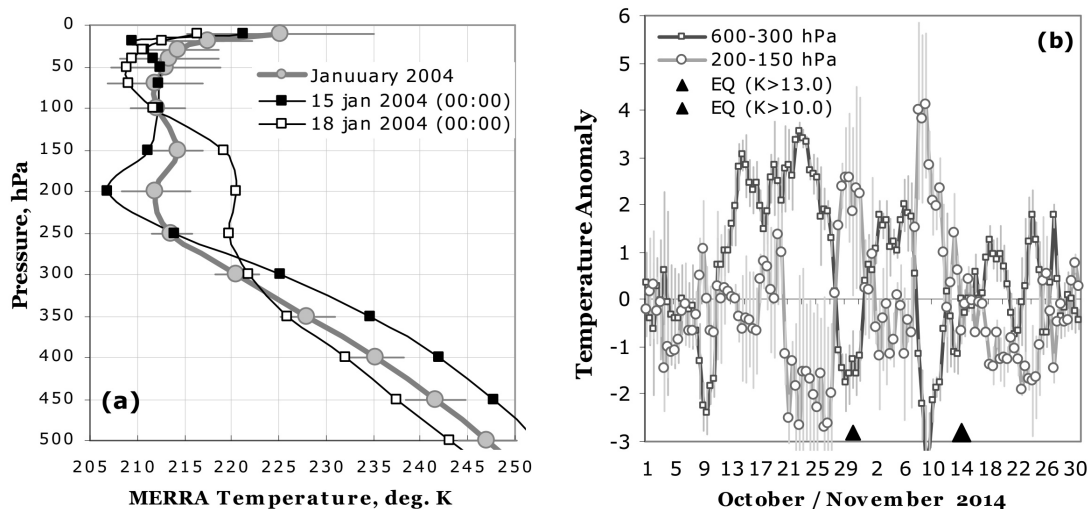


Рисунок 1 – Трансформация вертикальных профилей температуры по данным спутниковых измерений 15 и 18 января 2004 г. (а) и вариации температурных аномалий в октябре–ноябре 2014 г. (б)

следствие, в области инверсионного распределения температуры могут возбуждаться внутренние гравитационные волны [10]. Наблюдаемые перед сильными землетрясениями противофазные изменения температуры с нарастающей амплитудой в области высот выше и ниже полярной тропопаузы (200–150 hPa) визуализируют возникающие инфранизкочастотные гравитационные волны (рисунок 1, b). При этом резкое увеличение амплитуды колебаний температуры может вызываться эффектом отражения волн от тропопаузы и интерференцией с прямой волной.

Анализ временных рядов  $\Theta T_{FT}$  и  $\Theta T_{TP}$  проводился с использованием метода скользящего "окна", который основан на представлении каждого члена ряда в виде среднего  $m$  предыдущих наблюдаемых значений [11]:

$$\Theta T_l^s = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \Theta T_{l+j}(p_k),$$

где  $\Theta T_l$  – исходный ряд ( $l = 1, 2, 3, \dots, n$ ),  $\Theta T_l^s$  – преобразованный ряд ( $l = m, \dots, n$ ),  $m$  – ширина "окна";  $n$  – длина временного ряда;  $p_k$  – изобарический уровень.

Вместо среднего значения целесообразно использовать другие параметры, объективно характеризующие особенности изменчивости рядов температурных аномалий в периоды перед сильными землетрясениями. Выбор параметра производился из следующих статистических показателей:

\* дисперсия – Method 1

$$D_{\Theta T} = \sigma_{\Theta T}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Theta T(t_i, p_k) - \langle \Theta T(p_k) \rangle)^2}{n};$$

\* размах (разница между максимумом и минимумом) – Method 2

$$R_{\Theta T} = \Theta T_{\max}(t_i, p_k) - \Theta T_{\min}(t_i, p_k);$$

\* коэффициент вариации (отношение среднеквадратического отклонения к средней величине) – Method 3

$$V_{\Theta T} = \frac{\sigma_{\Theta T}(t_i, p_k)}{\langle \Theta T(t_i, p_k) \rangle} \times 100\%;$$

\* структурная функция (средний квадрат разностей членов временного ряда, разделенных расстоянием в  $r$  шагов) – Method 4

$$S_r = \frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^{n-r} (T_{i+r}(p_k) - T_i(p_k))^2,$$

где  $(n-r)$  – интервал осреднения;  $r$  – сдвиг структурной функции. Результаты, полученные при использовании скользящих структурных функций, будут обсуждены в отдельной работе.

В отсутствие строгого правила, позволяющего подбирать оптимальный размер "окна", практическое применение метода показало, что при наличии достаточного числа элементов временного ряда ( $n = 60-180$ ) наилучшие результаты были получены при ширине "окна"  $m = 6$ . В отдельных случаях величина  $m$  корректировалась в пределах от 5 до 7. Согласно полученным ранее данным [5], в спектре колебаний температуры присутствует 5–6-дневная цикличность. Выбранный размер скользящего "окна" позволяет анализировать квазипериодические компоненты ряда данного временного масштаба.

Заключительная процедура анализа временных рядов  $\Theta T$  может рассматриваться, как модификация критерия Голдфелда–Квандта (Goldfeld–Quandt), который применяется, когда есть пред-

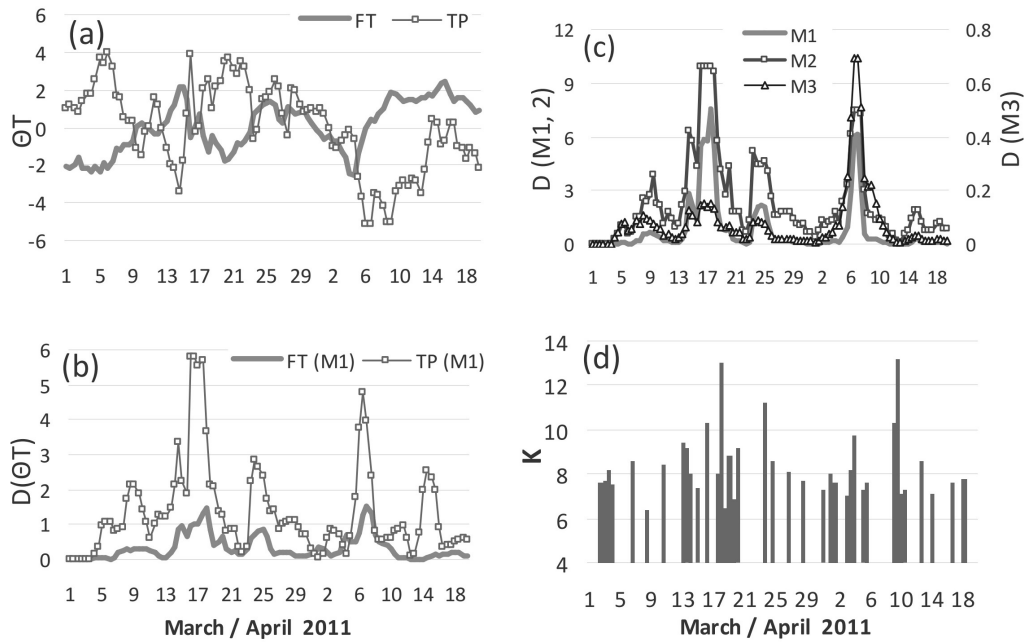


Рисунок 2 – Временная динамика аномалий средних значений температуры (а) и скользящего значения дисперсии (б) в слоях атмосферы 600–300 и 200–150 hPa; параметра вариации (с), вычисленного с использованием среднего квадрата отклонений (*Method 1*), размаха (*Method 2*) и коэффициента вариации (*Method 3*); сейсмическая активность в марте–апреле 2011(д)

положение о прямой зависимости дисперсии от некоторого признака. Данная процедура позволяет выделить обусловленные литосферными процессами колебательные возмущения в области инверсионного распределения температуры (термической тропопаузы), которые проявляются, как относительно быстрые ( $n=2-3$  дня), аномальные ( $\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k) > \sigma_T(x_i, y_j)$ ) и коррелированные ( $D_{\Theta T}^{FT} \geq 1$  и  $D_{\Theta T}^{TP} \geq 1$ ) изменения температуры на двух высотных уровнях атмосферы:

$$D_{\Theta T} = D(\Theta T_{FT}) \cdot D(\Theta T_{TP}) = D_{\Theta T}^{FT} \cdot D_{\Theta T}^{TP}.$$

Произведение значений дисперсии температуры в выбранном окне (параметр  $D_{\Theta T}$ ) значительно превышает единицу при больших значениях дисперсии, но существенно меньше единицы в отсутствии флуктуаций температуры, когда естественная изменчивость не выходит за пределы среднемесячных значений:  $\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k) < \sigma_T(x_i, y_j)$ , или при воздействии случайных возмущающих факторов ( $D_{\Theta T}^{FT} \leq 1$  или  $D_{\Theta T}^{TP} \leq 1$ ).

На рисунке 2 представлены графики, иллюстрирующие все этапы применения описанной методики к временным рядам температуры атмосферы в марте–апреле 2011 года. Сопоставление данных о сейсмической активности и особенностей поведения  $\Theta T_{FT}$  и  $\Theta T_{TP}$  с использованием метода скользящего окна

и различных статистических параметров (дисперсия, размах, коэффициент вариации), показало преимущество применения параметра  $D_{\Theta T}$  (*Method 1*).

**Методика диагностирования аномальных возмущений температуры и уходящей длинноволновой радиации.** Разнообразие процессов, происходящих в атмосфере и связанных с сейсмической активностью, предполагает одновременное применение нескольких методов диагностирования аномальных возмущений. Для локализации области подготовки землетрясений использовали следующие подходы. Во-первых, по профилям температуры  $T(p)$  определяли высоту термической тропопаузы и идентификацию случаев наличия двойной тропопаузы ( $DT$ ) на основе критериев Всемирной Метеорологической Организации [6, 12]. Разность температур ( $\Delta T$ ) между изобарическими поверхностями 250 ( $T_{250}$  hPa) и 70 hPa ( $T_{70}$  hPa), которые соответствуют уровням полярной и тропической тропопаузы, определяли как

$$\Delta T = T_{250\text{hPa}} - T_{70\text{hPa}}.$$

Специально разработанная техника построения разностных карт распределения температуры на этих двух уровнях позволило установить пространственное расположение области минимума  $\Delta T$  и, соответственно, область максимального перекрытия двух тропопауз:

$$\Delta T = \left| T_{250hPa}(x_i, y_j, t, n) - T_{70hPa}(x_i, y_j, t, n) \right|,$$

где  $n$  – дни;  $t$  – время измерения;  $x$  – широта,  $y$  – долгота;  $i, j$  – точки сетки координат исследуемой области с разрешением  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ .

Далее для каждого пиксела ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ) определяли зональную аномалию уходящей длинноволновой радиации, обозначенную как индекс  $OLR_{dE}$ , представляющую собой отклонение текущего значения  $OLR$  от среднемесячного уровня за многолетний период [9], а именно:

$$OLR_{dE} = \frac{S(x_i, y_j, n) - \bar{S}(x_i, y_j)}{\sigma(x_i, y_j)},$$

где  $n$  – дни;  $x$  – широта,  $y$  – долгота;  $i, j$  – обращение к точкам сетки координат ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ );  $S(x_j, y_j, n)$  – текущее значение  $OLR$ ;  $\bar{S}(x_i, y_j)$  – среднемесячное значение  $OLR$ ;  $\sigma(x, y)$  – среднеквадратическое отклонение. Критерием аномалии  $OLR$  являлось превышение текущего значения уходящей длинноволновой радиации за выбранный день относительно основного поля  $OLR$  на уровень  $2\sigma$ .

Разработанная методика и алгоритмы анализа аномальных вариаций температуры атмосферы и уходящей длинноволновой радиации, предшествующих сильным сейсмическим событиям, доведены до программной реализации в среде *MATLAB*.

**Заключение.** Анализ спутниковых данных показал, что возникновению большинства наиболее сильных сейсмических событий, произошедших в рассматриваемом регионе в 2003–2015 гг., предшествовало резкое изменение температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы. Разработанная методика и средства программного обеспечения позволяют исследовать особенности трансформации вертикальной термической структуры атмосферы, закономерности ее пространственно-временной изменчивости и выявить аномалии температуры и уходящей длинноволновой радиации в периоды подготовки землетрясений.

Авторы выражают благодарность руководителям и сотрудникам научных проектов NOAA/ESRL и MERRA 3D за их усилия по обработке результатов измерений и обеспечение свободного доступа к данным, используемым в настоящем исследовании.

#### Литература

1. Saradjian M.R. and Akhoondzadeh M. Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters / M.R. Saradjian and M. Akhoondzadeh // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2011. 1109–1119.
2. Свердлик Л.Г. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. № 4. С. 9–14.
3. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере / В.Б. Кашкин // Оптика атмосферы и океана. 2013, 26, №10. С. 908–916.
4. Свердлик Л.Г. Динамика температуры тропосферы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 23–27.
5. Имашев С.А. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. / С.А. Имашев, Л.Г. Свердлик // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 15–19.
6. Свердлик Л.Г. Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений в 2003–2014 гг. / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. № 3. С. 16–19.
7. Пулинец С.А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера / С.А. Пулинец, Д.П. Узун, А.В. Карелин, К.А. Боярчук, А.В. Тертышников, и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2012. Т. 3. № 68. С. 21–42.
8. Тертышников А.В. Перспективы мониторинга сейсмических условий из космоса / А.В. Тертышников, В.В. Платонов // Электронный научный журнал «Исследовано в России». 2007. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/031>.
9. Venkatanathan N. Outgoing longwave radiations as pre-earthquake signals: preliminary results of 24 September 2013 (M 7.7) earthquake / N. Venkatanathan, V. Natyaganov // Current Science. 2014. Vol. 106. No. 9.
10. Кашкин В.Б. Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным / В.Б. Кашкин, А.С. Григорьев // Вестник СибГАУ. 2013. № 5. С. 31–34.
11. Суслов В.И. Эконометрия. Анализ временных рядов / В.И. Суслов, Н.М. Ибрагимов и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 744 с.
12. World Meteorological Organization. Meteorology—A three-dimensional science: Second session of the commission for aerology. WMO Bulletin. 1957. 4(4). 134–138.