

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АТМОСФЕРЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

*Свердлик Л.Г., Имашев С.А.*

**СЕЙСМИКАЛЫК АКТИВДУУЛУКТУН ТААСИРИ АСТЫНДА АТМОСФЕРАНЫН ТЕМПЕРАТУРАЛЫК РЕЖИМИНИН ӨЗГӨРҮҮСҮ**

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

**ATMOSPHERIC TEMPERATURE REGIME CHANGE INFLUENCED BY SEISMIC ACTIVITY**

УДК: 551.507: 551.524: 550.34

*Представлена методика анализа процессов трансформации профилей температуры, основанная на выявлении аномалий термической стратификации атмосферы (в зоне раздела тропосферы и стратосферы) и закономерностей их проявления над эпицентрами сильных землетрясений.*

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

*Температуранын профильдеринин трансформация процесстерин анализдөө методикасы көрсөтүлдү. Ал атмосферанын термикалык стратификация (тропофера жана стратосфера бөлүнүү чегинде) аномалияларын жана алардын күчтүү жер титирөөлөрдүн эпицентрларында көрүнүп чыгуу закон ченемдүүлүктөрүн издеп табууга негизделген.*

*Негизги сөздөр:* спутник маалыматтары, температура профильдери, тропопауза, жер титирөө, атмосферадагы гравитациялык толкундар, аномалиялар.

*The technique of analysis of temperature profiles transformation processes based on revealing of anomalies in thermal stratification of atmosphere (in troposphere and stratosphere division zone) and of laws of their manifestation over the epicenters of strong earthquakes is presented.*

*Key words:* satellite data, temperature profiles, tropopause, earthquake, atmospheric gravity waves, anomalies.

**1. Введение**

Происходящие ежегодно на Земле десятки сильных землетрясений, которые приводят к многочисленным жертвам и разрушениям, обусловили повышенное внимание во всем мире к этой проблеме. Несмотря на сложности реализации, к настоящему времени выполнено множество исследований, в которых предложены способы прогнозирования сейсмической активности [1,2,3]. Основаны они на регистрации аномального поведения различных характеристик, как в земной коре и приповерхностной лито-

сфере, так и в атмосфере и ионосфере. К числу термодинамических предвестников сильных землетрясений, наблюдаемых в тропосфере, могут быть отнесены изменения газового состава, прозрачности, температуры, влажности, спектра и интенсивности акустико-гравитационных волн [2,4].

Развитие и совершенствование методов дистанционного зондирования атмосферы, и особенно спутниковых измерений, создало предпосылки для изучения пространственно-временной структуры температуры атмосферы на различных высотных уровнях. Выполненные в последние годы исследования изменений вертикальных профилей температуры, происходящих в области тропопаузы перед сильными сейсмическими событиями [5,6,7,8], показали информативность и перспективность использования для прогнозирования сейсмической опасности.

Целью данной работы является исследование временного и высотного распределения температуры и выявление общих закономерностей аномальных полей в зоне раздела тропосферы и стратосферы, связанных с сейсмической активностью в регионе.

**2. Используемые данные**

Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы использовались данные спутниковых измерений, полученные прибором ATOVS/NOAA на 23-х изобарических уровнях ( $p_k$ ) от 800 hPa до 10 hPa [7]. Вертикальные профили температуры  $T(p_k)$  были восстановлены для временных периодов, составляющих 25-40 дней до и 10-15 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.

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

### 3. 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 атмосферы

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

над каждым участком размером  $\pm 1^\circ$  от очага землетрясения, измеренные через постоянные интервалы времени ( $\Delta t = 12$  часов). Временная динамика аномалий температуры ( $\Theta T$ ) рассчитывалась, как отклонение текущего значения температуры от среднемесячного уровня, нормированное на среднеквадратичное отклонение, а именно:

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 ( $\Theta T_{TP}$ ). Особенностью 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 (рис. 1а).

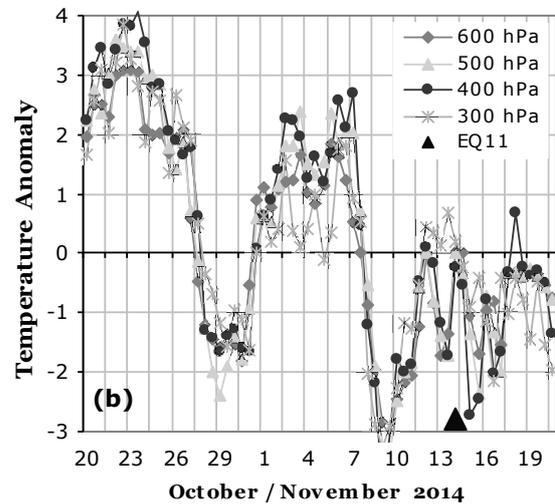
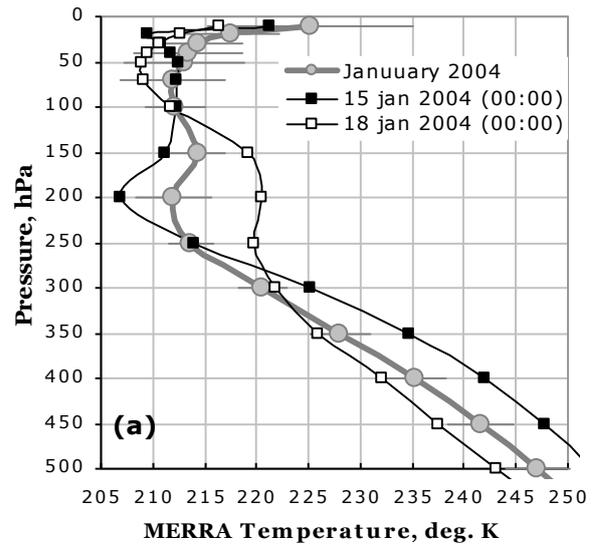


Рис. 1. Трансформация вертикальных профилей температуры по данным спутниковых измерений 15 и 18 января 2004 г. (а) и изменчивость аномалий температуры в октябре–ноябре 2014 г. (б).

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 следствие, в области инверсионного распределения температуры могут возбуждаться внутренние гравитационные волны [9]. Наблюдаемые перед сильными землетрясениями противофазные изменения температуры с нарастающей амплитудой в области высот выше и ниже полярной тропопаузы (200–250 hPa) визуализируют возникающие инфранизкочастотные гравитационные волны (рис. 1б). При этом резкое увеличение амплитуды колебаний температуры может вызываться эффектом отражения волн от тропопаузы и интерференцией с прямой волной [10].

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

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

где  $\Theta T_i$  – исходный ряд ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),  $\Theta T_l^s$  – 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*

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

∨ 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 (CKO) к средней величине) – *Method 3*

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

В отсутствие строгого правила, позволяющего подбирать оптимальный размер "окна", практическое применение метода показало, что при наличии достаточного числа элементов временного ряда ( $n=60 \div 110$ ) наилучшие результаты были получены при ширине "окна"  $m=6$ . В отдельных случаях величина  $m$  корректировалась в пределах от 5 до 7.

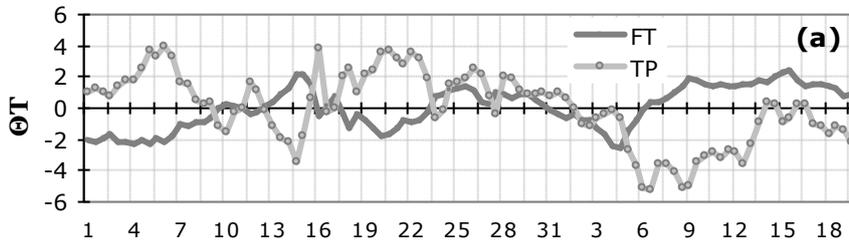
Согласно полученным ранее данным [6], в спектре колебаний температуры присутствует 5–6-дневная цикличность. Выбранный размер скользящего "окна" позволяет анализировать квазипериодические компоненты ряда данного временного масштаба.

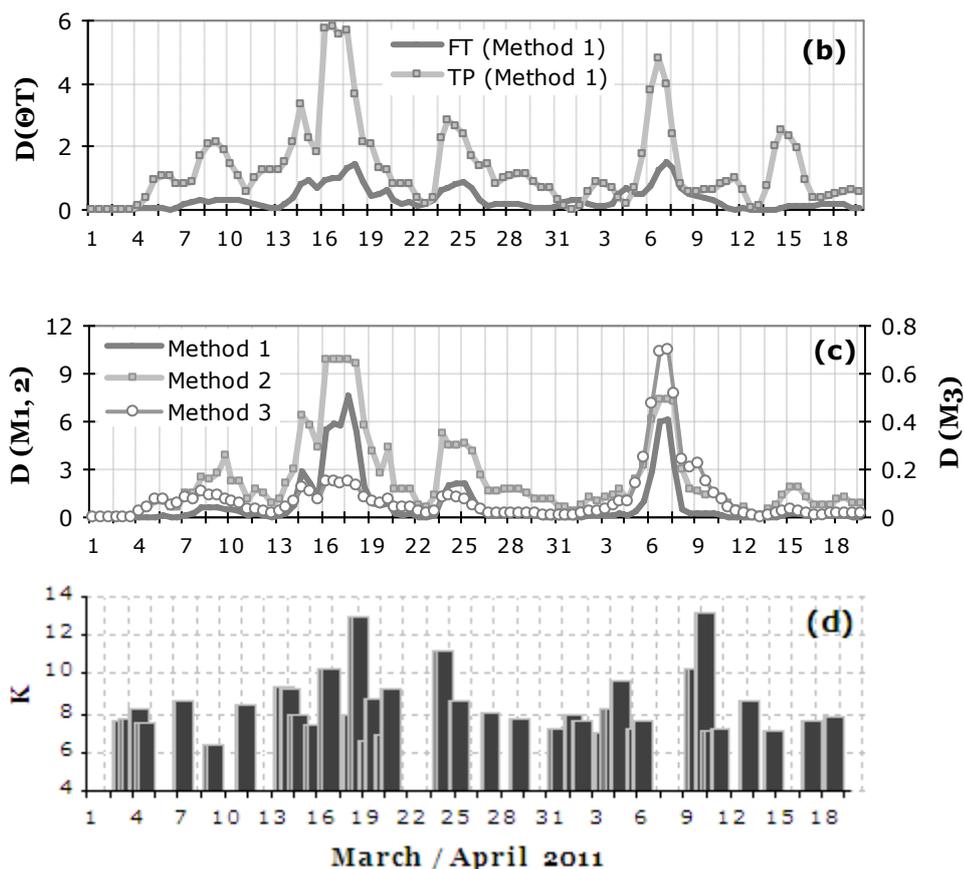
Заключительная процедура анализа временных рядов  $\Theta T$  может рассматриваться, как модификация критерия Голдфелда-Квандта (*Goldfeld-Quandt*), который применяется, когда есть предположение о прямой зависимости дисперсии от некоторого признака [12]. Данная процедура позволяет выделить обусловленные литосферными процессами колебательные возмущения в области инверсионного распределения температуры (термической тропопазы), 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 отсутствие флуктуаций температуры, когда естественная изменчивость не выходит за пределы среднемесячных значений:  $\Delta T(x_i, y_j, n, t, p_k) \ll \sigma_T(x_i, y_j)$ , или при воздействии случайных возмущающих факторов ( $D_{\Theta T}^{FT} \leq 1$  или  $D_{\Theta T}^{TP} \leq 1$ ).

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие все этапы применения описанной методики к временным рядам температуры атмосферы в марте – апреле 2011.





**Рис. 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).

Сопоставление данных о сейсмической активности и особенностей поведения  $\theta T_{FT}$  и  $\theta T_{TP}$  с использованием метода скользящего окна и различных статистических параметров (*СКО*, размаха, коэффициента вариации) показало преимущество применения параметра  $D_{\theta T}$  (*Method 1*).

Разработанная методика и алгоритм анализа аномальных вариаций температуры, предшествующих сильным сейсмическим событиям, доведена до программной реализации в среде *MATLAB*.

#### 4. Результаты применения методики к временным рядам температуры в периоды подготовки сильных землетрясений

Проверка применимости описанной методики к анализу временных рядов на предмет выявления аномальных вариаций высотного распределения температуры атмосферы, как вероятных предвестников землетрясений, выполнена на основе ретроспективного рассмотрения наиболее сильных сейсмических событий, произошедших на территории Кыргызской Республики в 2003-2014 годах [8]. Ре-

зультаты применения алгоритма к двум температурным рядам ( $\theta T_{FT}$  и  $\theta T_{TP}$ ) в виде совмещенных графиков динамики изменения параметра  $D_{\theta T}$  сейсмической активности ( $K \geq 6$ ) в указанные периоды времени приведены на рис. 3. Среди 8 исследованных землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 13.0$  в 7 случаях было установлено коррелированное изменение температуры в области тропопаузы. Явно выраженные аномалии пространственно-временного распределения температуры над эпицентральной областью предстоящего сильного землетрясения наблюдались примерно за 1-5 дней до начала события. Большой разброс значений  $D_{\theta T}$  (от  $\sim 2$  до  $\sim 8$ ) подтверждает, что основными признаками приближающегося землетрясения можно считать не только абсолютные значения вариаций температуры, но и, главным образом, форму (скорость) ее изменения во времени [13]. На эти типичные для большей части рассматриваемых событий признаки и сделан акцент в предложенном алгоритме анализа аномальных вариаций температуры.

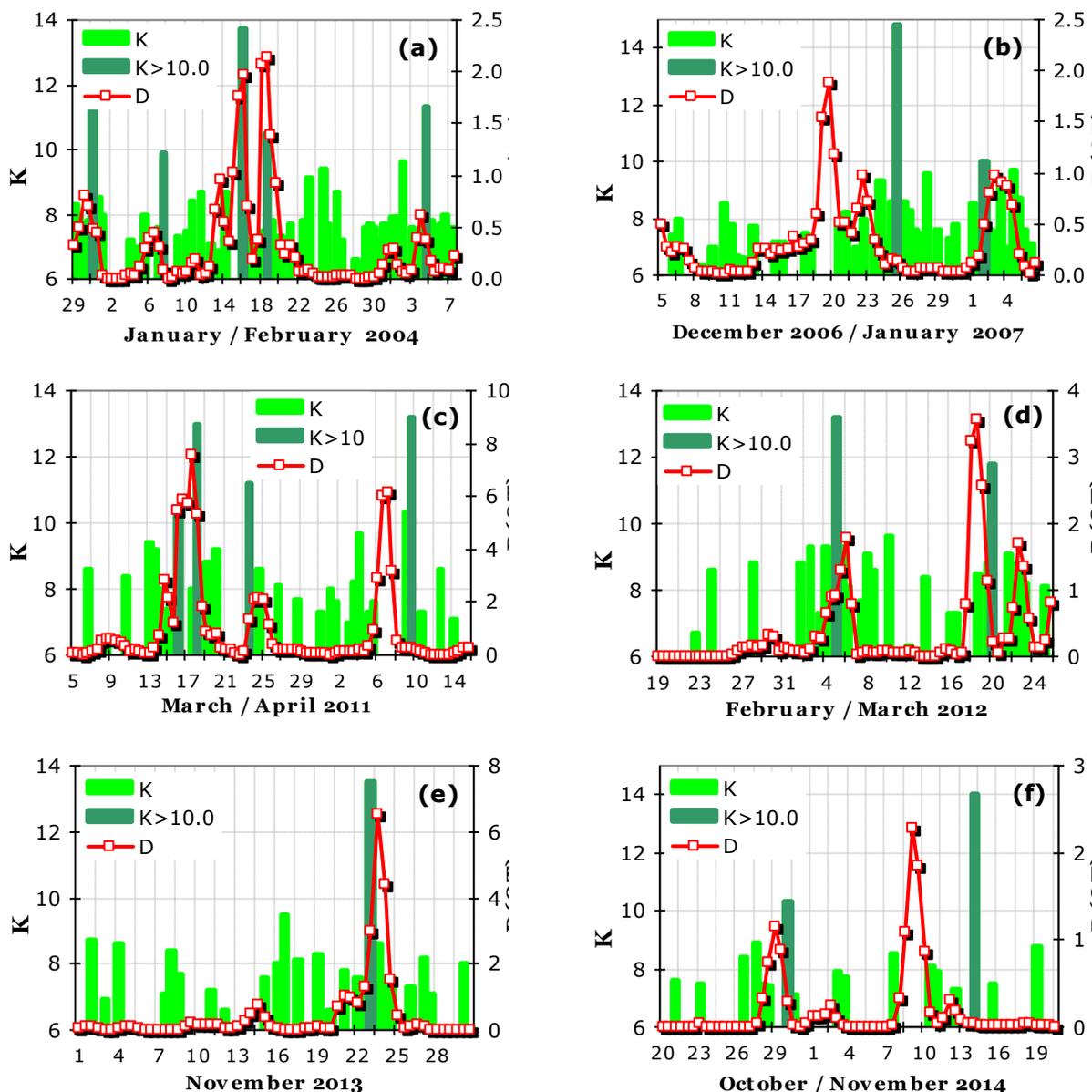


Рис. 3. Динамика изменения параметра  $D_{\text{от}}$  и сейсмической активности ( $K \geq 6$ ) в январе–феврале 2004 (а), декабре 2006 (б), марте–апреле 2011 (с), феврале–марте 2012 (д), ноябре 2013 (е) и октябре–ноябре 2014 (ф).

Полученные результаты показали эффективность предлагаемой методики для прогноза землетрясений энергетического класса  $K \geq 10.0$ .

### 5. Заключение

Проанализировано поведение вертикальных профилей температуры (*NOAA/ATOVS*) в периоды подготовки землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 13.0$  ( $K \geq 10.0$ ). Установлено, что возникновению большинства сейсмических событий, произошедших в рассматриваемом регионе в 2003-2014 г.г., предшествует резкое изменение температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы.

Специально разработанные методы и средства программного обеспечения позволили исследовать особенности трансформации вертикальной структуры атмосферы, закономерности ее простран-

венно-временной изменчивости и выявить аномалии температуры в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

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. 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. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2011, 1109–1119.
2. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Боярчук К.А., Тертышников А.В., и др. Единая концепция обнаружения

- признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера - атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Космонавтика и ракетостроение, 2012, Т. 3, № 68, С. 21–42.
3. Chmyrev V., A. Smith, D. Kataria, B. Nesterov, C. Owen, P. Sammonds, V. Sorokin, F. Vallianatos Detection and monitoring of earthquake precursors: TwinSat, a RussiaUK satellite project. *Advances in Space Research*, 2013, 52, 1135-1145.
  4. Тертышников А.В., Платонов В.В. Перспективы мониторинга сейсмических условий из космоса. Электронный научный журнал «Исследовано в России», 2007, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/031>.
  5. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере. *Оптика атмосферы и океана*, 2013, 26, №10, С. 908–916.
  6. Имашев С.А. и Свердлик Л.Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. *Наука и новые технологии*, 2015, №1, С. 15-19.
  7. Свердлик Л.Г. и Имашев С.А. Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане. *Наука и новые технологии*, 2015, №1, С. 23-27.
  8. Свердлик Л.Г. и Имашев С.А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений в 2003–2014 г.г. *Наука, новые технологии и инновации*, 2015, №3, С. 16-19.
  9. Кашкин В. Б., Григорьев А. С. Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным. *Вестник СибГАУ*, 2013, № 5, С. 31-34.
  10. Винниченко Н.К., Пикус Н.З., Шметер С.М., и др. Турбулентность в свободной атмосфере. Гидрометеориздат, 1976, 286 с.
  11. Суслов В.И., Ибрагимов Н.М. и др. Эконометрия. Анализ временных рядов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005, 744 с.
  12. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс. М.: Дело, 2007, 504 с.
  13. Пулинец С. А., Романов А. А., Урличич Ю. М., Романов мл. А.А., Дода Л. Н., Узунов Д. Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине. *Геомагнетизм и Аэронавигация*, 2009, Т. 49, № 1, с. 1–10.

**Рецензент: д.ф.-м.н. Рыбин А.К.**