

УДК [551.510:551.524]:550.34

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев

Представлены результаты диагностирования аномалий термической стратификации атмосферы в области тропопаузы над эпицентрами землетрясений энергетического класса $K > 13.0$, произошедших в 2003–2015 гг.

Ключевые слова: спутниковые данные; профили температуры; тропопауза; землетрясение; аномалии; уходящая длинноволновая радиация.

DIAGNOSTICS RESULTS OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE ANOMALIES DURING SEISMIC ACTIVITY

L.G. Sverdlik, S.A. Imashev

The paper describes the results of diagnosis of atmospheric thermal stratification anomalies in tropopause zone over the earthquakes epicenters with energetic class of $K > 13.0$, which occurred during the period of 2003–2015.

Keywords: satellite data; temperature profiles; tropopause; earthquake; anomalies; outgoing longwave radiation.

Введение. Принято считать, что при подготовке и прохождении сильных сейсмических событий генерируются интенсивные инфразвуковые колебания в атмосфере – акустико-гравитационные волны (АГВ) [1]. Распространение волн сейсмогравитационного происхождения сопровождается радиационным переносом энергии и импульса от подстилающей поверхности в атмосферу, где происходит диссипация этой энергии и, как следствие, формирование турбулентных областей и изменение термической структуры атмосферы. Одной из современных тенденций при детектировании температурных возмущений в атмосфере, связанных с литосферными процессами, является использование средств спутникового дистанционного зондирования, к основным достоинствам которых можно отнести глобальность охвата, включая горные районы, регулярность получения данных, оперативность [2].

В настоящей работе представлены результаты, полученные с использованием разработанной методики диагностирования аномалий температуры [3], и основанные на ретроспективном анализе процессов трансформации профилей температуры ($T(p)$) в зоне раздела тропосферы и стратосферы в периоды наиболее сильных сейсмических событий. Подробная информация об используемых данных и методике их обработки изложена в работе [4].

Общая статистика сейсмических данных.

На рисунке 1, а представлено распределение повторяемости землетрясений энергетического класса (K) от 6.0 до 14.8, которые произошли с января 2003 по декабрь 2015 г. В число всех сейсмических событий ($N = 5075$) преобладающий вклад вносили слабые землетрясения ($K = 6.5–9.0$, рисунок 1, б), большая часть гипоцентров которых находилась в земной коре на глубинах 5.0–18.0 км (рисунок 1, с).

Пространственное распределение эпицентров 15 исследуемых землетрясений энергетического класса от 13.0 до 14.8 по данным каталога землетрясений Института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке показано на рисунке 2. Крупнейшие землетрясения, произошедшие в регионе в последние годы, наиболее активно проявляли себя в пределах территории, ограниченной координатами: $41.0 \div 43.0^\circ N$, $74.5 \div 76.0^\circ E$.

Динамика температуры атмосферы накануне сильных землетрясений. На стадии предварительной обработки данных рассчитывали средние значения температуры в свободной тропосфере ($T_m(FT)$) и в области, расположенной между тропической и полярной тропопаузой ($T_m(TP)$), что позволило оценить поведение этих параметров до и после сильных землетрясений. На рисунке 3, а, б, с показаны временные ряды T_m в слоях

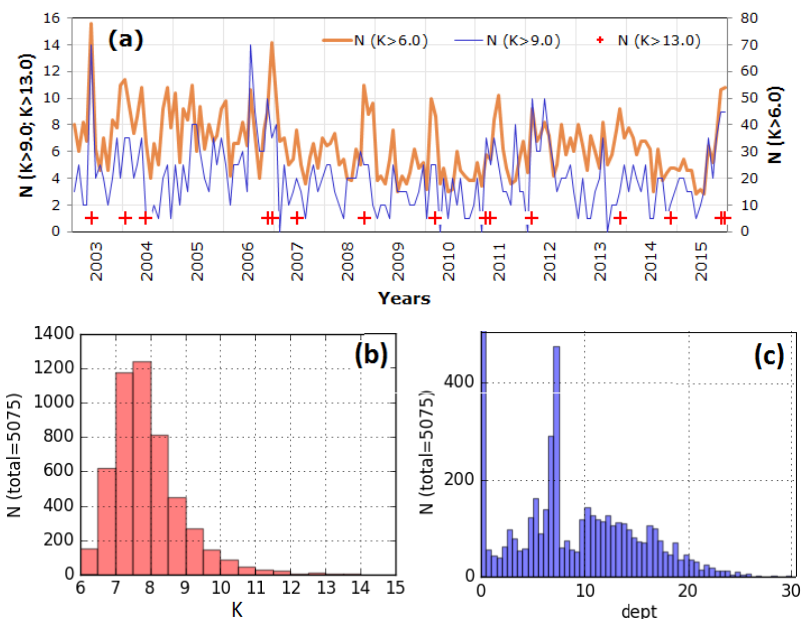


Рисунок 1 – Распределения числа сейсмических событий ($K \geq 6.0$; ≥ 9.0 ; ≥ 13.0) по времени (месяцам) (а), энергетическому классу (б) и глубине (с)

атмосферы 400–250 и 150–70 hPa в периоды 01–31 декабря 2006 г. (EQ05), с 03 февраля по 08 марта 2010 г. (EQ08) и 01–30 ноября 2013 г. (EQ12).

Наиболее сильная отрицательная корреляция между рядами температуры в указанных слоях ($R \leq -0.71$) прослеживалась в периоды 14–18 дней до основного события (рисунок 3, d, e, f). После землетрясений амплитуды колебаний температуры существенно уменьшались, что может свидетельствовать о связи наблюдаемых вариаций температуры с процессом подготовки землетрясения.

Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений. Расчет аномалии температуры (θT) производили относительно среднего значения, с которым сравнивали все данные за выбранный период [4]. Результаты применения разработанного алгоритма к двум рядам аномалий температуры (θT_{FT} и θT_{TP}) в виде совмещенных графиков динамики изменения параметра $D_{\theta T}$ и сейсмической активности ($K \geq 6.0$) в указанные периоды времени приведены на рисунке 4. Среди 12 исследованных землетрясений с энергетическим классом $K \geq 13.0$ в 9 случаях было установлено коррелированное изменение температуры в области тропопаузы. Явно выраженные аномалии пространственно-временного распределения температуры над эпицентральной областью предстоящего сильного землетрясения наблюдали примерно за 1–5 дней до начала события [4, 5]. Большой разброс значений $D_{\theta T}$ (от ~ 2 до ~ 8) подтверждает, что

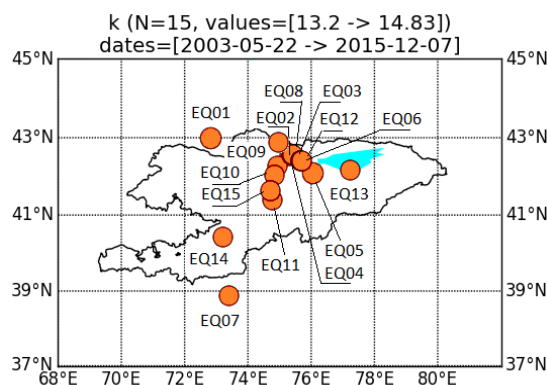


Рисунок 2 – Расположение эпицентров землетрясений энергетического класса от 13.0 до 14.8. Обозначения соответствуют таблице 1 [4]

основными признаками приближающегося землетрясения можно считать не только абсолютные значения амплитуд вариаций температуры, но и, главным образом, форму (скорость) ее изменения во времени [6, 7]. На эти типичные для большей части рассматриваемых событий признаки и сделан акцент в предложенном алгоритме анализа аномальных вариаций температуры [3, 4].

Данные спутниковых наблюдений были использованы для построения высотно-временных разрезов аномалий температуры атмосферы (θT). Как показано на рисунке 5, процесс формирования

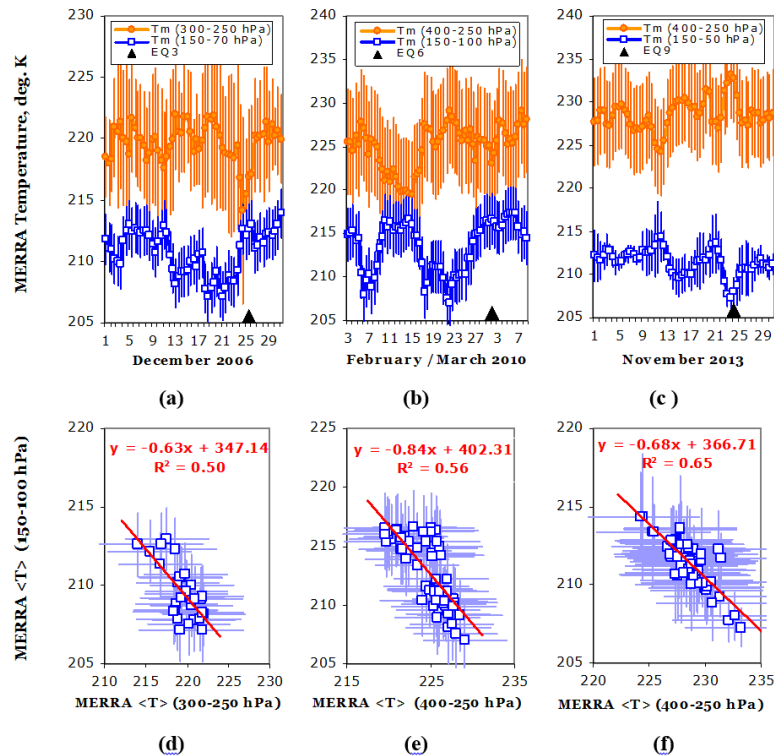


Рисунок 3 – Вариации температуры в слоях атмосферы: а – с 01 по 31 декабря 2006 (EQ05); б – с 03 февраля по 08 марта 2010 (EQ08); в – с 01 по 30 ноября 2013 (EQ12) и корреляционная связь между рядами $\langle T_m \rangle$ (d, e, f)

аномалий перед сильным сейсмическим событием состоит из нескольких короткопериодических (2–3 дня) противофазных изменений температуры в областях выше (11.0–15.0 км) и ниже (5.0–10.0 км) полярной тропопаузы. При этом происходит непрерывное и согласованное изменение термического состояния атмосферы на разных высотах. Увеличение амплитуды колебаний температуры и перераспределение энергии между атмосферными уровнями может вызываться, в том числе, интенсивным генерированием АГВ и ВГВ, а также эффектом отражения волн от тропопаузы и интерференцией с прямой волной.

Аномалии пространственного распределения температуры. Выполненное ранее исследование профилей температуры атмосферы [6] показало, что по большей части двойная тропопауза DT находится на полюсах струйных течений и образуется зимой в средних широтах, как правило, над сильными циклоническими системами циркуляции и/или их образование сопровождается областями пониженной концентрации озона.

Критерии выбора особых точек [8, 9], в которых происходит резкое изменение градиента температуры или ее инверсия позволили выделить

случаи возникновения двойной тропопаузы. Как показано на рисунке 6, а, представляющем усредненный за декабрь профиль температуры $T(p) \pm \Delta T(p)$ и вертикальные распределения $T(p)$ накануне основного сейсмического события (25 декабря 2006 г.), среднеширотная полярная тропопауза располагалась на уровне 250 hPa (~10.0–11.0 км), а тропическая на уровне 70 hPa (~17.0–18.0 км). Области расположения тропопауз испытывали резкие изменения значений температуры (~3–6 °K), которые начинались за 1–2 суток до сильного землетрясения и носили противофазный характер [3, 10]. При этом наблюдалось увеличение вертикальных градиентов в слоях над и под полярной тропопаузой, т. е. положительный тренд контрастности тропопаузы. Как следствие, временные ряды разности температур между изобарическими поверхностями 250 и 70 hPa и диаграмма сейсмической активности (K) показали, что в вариациях ΔT проявлялся явный минимум примерно за сутки до самого сильного сейсмического толчка (рисунок 6, б).

Изменения теплового поля, представленные в виде пространственных карт распределения температуры на уровнях 250 и 70 hPa, были разнесены и не имели точек соприкосновения 23 декабря

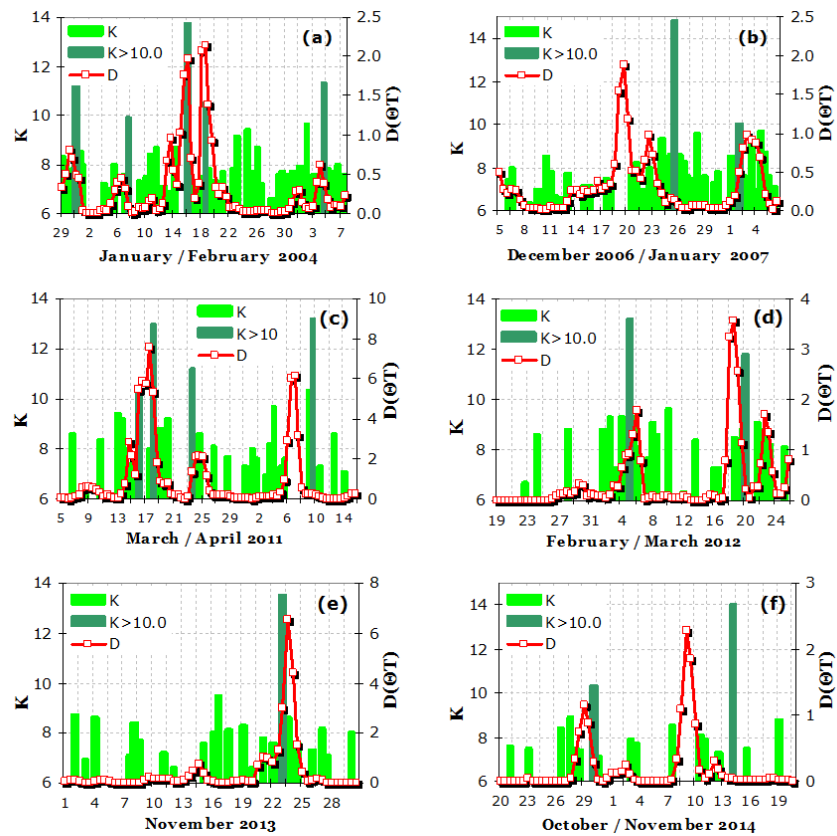


Рисунок 4 – Динамика изменения параметра D_{OT} и сейсмической активности ($K \geq 6.0$) в январе–феврале 2004 (а), декабре 2006 (б), марте–апреле 2011 (с), феврале–марте 2012 (д), ноябре 2013 (е) и октябре–ноябре 2014 (ф)

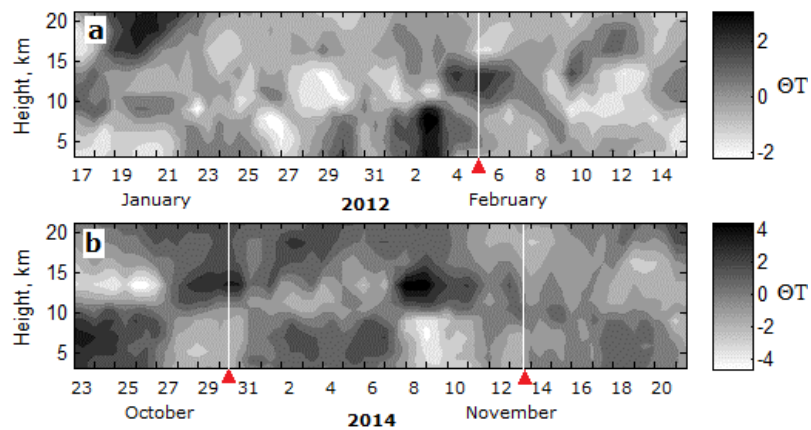
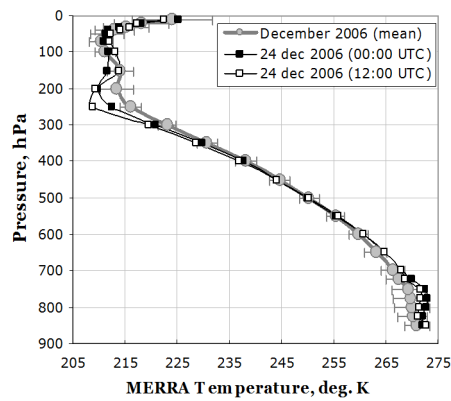


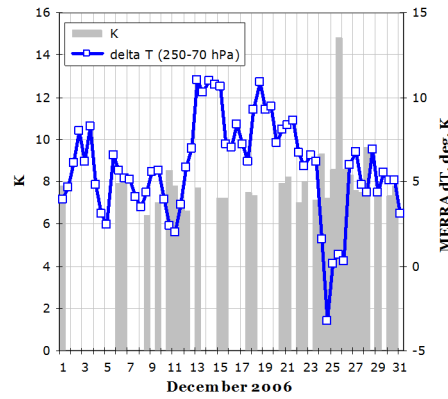
Рисунок 5 – Высотно-временные распределения аномалии температуры атмосферы (θ_T) над эпицентрами землетрясений: а – в период с 17 января по 15 февраля 2012 г.; б – с 23 октября по 21 ноября 2014 г.

(рисунок 7, а) и, напротив, хорошо выраженная область пересечения наблюдалась накануне землетрясения 25 декабря 2006 г. (рисунок 7, б).

Для более наглядной визуализации выявленной отличительной черты аномального поведения разности температур на рисунке 8 приведено



(a)



(b)

Рисунок 6 – Вертикальные профили температуры по данным спутниковых измерений (a); вариации ΔT между изобарическими уровнями 250 и 70 hPa и сейсмическая активность (K) в декабре 2006 г. (b)

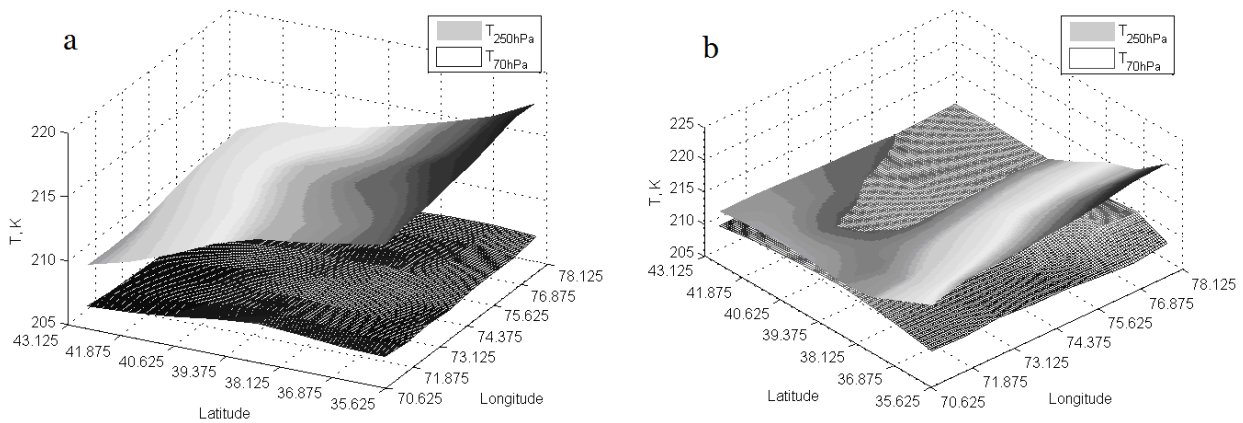


Рисунок 7 – Горизонтальные разрезы температурных полей на уровнях 250 и 70 hPa: 23-го (a) и 25 декабря 2006 (b)

сравнение карт пространственного распределения ΔT для измерений 23 и 25 декабря 2006 г.

Расположение аномалий разностных значений температуры (области равных значений ΔT) вокруг эпицентра землетрясения свидетельствует об устойчивом характере теплового поля, которое может служить краткосрочным предвестником сильного сейсмического события.

Аномалии пространственного распределения индекса OLR. Пространственно-временное распределение компонентов радиационного баланса Земли на верхней границе атмосферы, включая приходящий поток прямой солнечной радиации (в диапазоне длин волн $\Delta\lambda=0.2-4.0$ мкм), и испускаемую поверхностью Земли и облачными слоями длинноволновую радиацию ($\Delta\lambda=8.0-12.0$ мкм), во многом определяет общую циркуляцию атмосферы и является одним из ключевых климатообразую-

щих факторов. В то же время, результаты измерений уходящей длинноволновой радиации показали аномальные вариации накануне средних и сильных землетрясений ($M>6.0$) в 2004–2013 гг. [11, 12]. Активизация тепловых аномалий в блоках земной коры обычно проявлялась за 4–20 суток до начала сейсмического события и, как предполагается, связана с интенсивностью землетрясения.

На рисунке 9 представлено распределение индекса OLR над исследуемой областью по данным спутниковых измерений 23.12.2006.

На карте отчетливо видно формирование термальных аномалий вблизи эпицентров двух землетрясений: $K = 14.8$ ($42.1^\circ N$; $76.0^\circ E$) и $K = 9.3$ ($40.9^\circ N$; $74.1^\circ E$), произошедших 24 и 25 декабря 2006 г., соответственно. Наблюдаемые максимумы параметра OLR_dE превышали удвоенную величину стандартного отклонения 2σ .

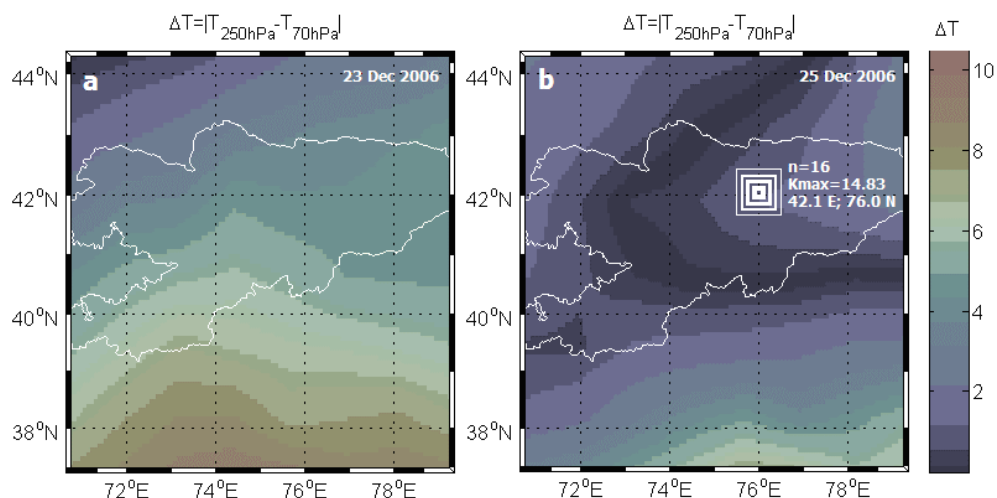


Рисунок 8 – Пространственное распределение разности температур ΔT : 23 декабря (а) и 25 декабря 2006 (б)

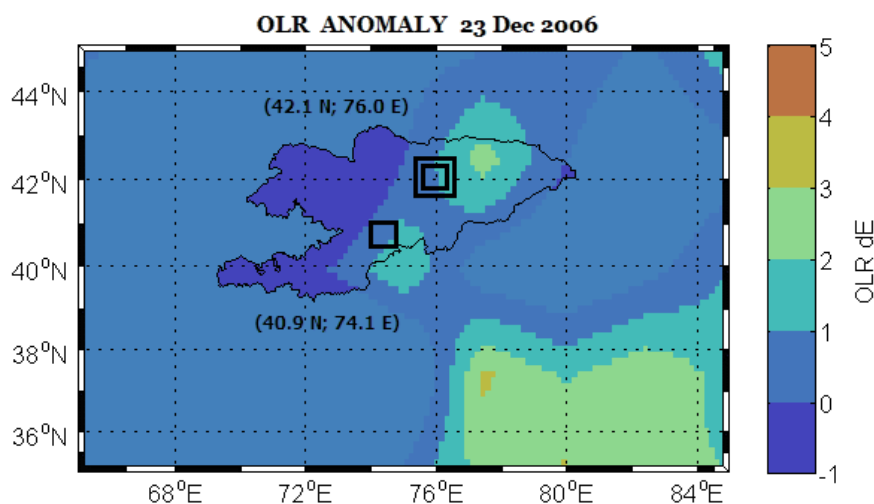


Рисунок 9 – Аномалии OLR вблизи эпицентров землетрясений:
 $K = 14.8$ (42.1°N и 76.0°E) 24 декабря и $K = 9.3$ (40.9°N и 74.1°E) 25 декабря 2006 г.

Заключение. Проанализировано поведение вертикальных профилей температуры (*MERRA-3D*, *AIRS/Aqua*) в периоды подготовки землетрясений с энергетическим классом $K \geq 13.0$. Установлено, что возникновению большинства сейсмических событий (~70 %), произошедших в рассматриваемом регионе в 2003–2015 гг., 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 пространственно-временной изменчивости и выявить аномалии

температуры в периоды подготовки сильных сейсмических событий.

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

Литература

1. Сverdlik Л.Г. Динамика температуры тропопазы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане / Л.Г. Сverdlik, С.А. Има-

- шев // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 23–27.
2. *Кашкин В.Б.* Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников Земли / В.Б. Кашкин, А.А. Романов, А.С. Григорьев, А.А. Баскова // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2012. № 2. С. 220–228.
 3. *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.
 4. *Свердлик Л.Г.* Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 5.
 5. *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. 2015. № 3. С. 16–19.
 6. *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.
 7. *Пулинец С.А.* Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине / С.А. Пулинец, А.А. Романов, Ю.М. Урличич, А.А. Романов мл., Л.Н. Дода, Д. Узунов // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2009. Т. 49. № 1. С. 1–10.
 8. *Peevey T.R.* Investigation of double tropopause spatial and temporal global variability utilizing High Resolution Dynamics Limb Sounder temperature observations / T.R. Peevey, J.C. Gille, C.E. Randall, A. Kunz // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. D1.
 9. World Meteorological Organization. Meteorology A three-dimensional science: Second session of the commission for aerology, WMO Bulletin, 1957, 4(4). P. 134–138.
 10. *Кашкин В.Б.* Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли / В.Б. Кашкин, К.С. Симонов, А.С. Григорьев // Инженерная экология. 2011. № 2. С. 38–54.
 11. *Ouzounov D.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes / D. Ouzounov, D. Liu, K. Chunli, G. Cervone, M. Kafatos, P. Taylor // Tectonophysics. 2007. 43. P. 1211–220.
 12. *Venkatanathan N., Natyaganov V.* Outgoing long-wave radiations as pre-earthquake signals: preliminary results of 24 September 2013 (*M* 7.7) earthquake. Current Science. 2014. Vol. 106. No. 9.