

УДК [551.510:551.524]:550.34

АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕВЕРНОМ И ЦЕНТРАЛЬНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.Г. Сverdlik, С.А. Imashev

Представлены результаты исследования атмосферных эффектов, наблюдаемых над эпицентрами землетрясений энергетического класса $K > 13.0$ (2004–2014 гг.). Рассмотрены проявления связанных с сейсмической активностью аномалий температуры, относительной влажности и давления на высотах в области тропопаузы.

Ключевые слова: спутниковые данные; профили температуры и относительной влажности; тропопауза; землетрясение; аномалии; давление на уровне тропопаузы.

ATMOSPHERIC EFFECTS OF EARTHQUAKES IN NORTHERN AND CENTRAL TIEN-SHAN ON SATELLITE DATA

L.G. Sverdlik, S.A. Imashev

The work presents the results of study of atmospheric effects observed over epicenters of earthquakes with energy class of $K > 13.0$ (2004–2014). Temperature anomalies, relative humidity and pressure near tropopause associated with seismic activity are considered.

Keywords: satellite data; temperature and relative humidity profiles; tropopause; earthquake; anomalies; tropopause pressure.

Введение. Прогресс в развитии методов дистанционного зондирования атмосферы, и особенно спутниковых измерений, создал предпосылки для исследования пространственно-временной структуры различных параметров атмосферы. Одним из направлений применения результатов подобных исследований является установление связи между динамикой литосферных процессов и аномальным поведением характеристик в атмосфере [1, 2]. В ряду аномалий, регистрируемых перед сильными землетрясениями, особое место занимают явления, сопровождающиеся большим выделением или адвекцией тепла [3, 4] и связанными с этим изменениями температуры, давления и относительной влажности воздуха.

Методика обработки данных. В опубликованных ранее работах [5–7] в качестве атмосферных эффектов, предвещающих наиболее сильные сейсмические события ($K \geq 13.0$), диагностировались аномальные изменения температуры (T) на изобарических уровнях, расположенных выше и ниже тропопаузы. Методика включает несколько процедур. На начальном этапе формировались временные ряды $T(t)$ на 23-х изобарических уров-

нях (p_k) от 800 hPa до 10 hPa, на основе которых рассчитывались средние значения температурных аномалий (ΘT) в слоях 600–300 hPa и 200–150 (150–100) hPa, которые примерно соответствуют свободной тропосфере (ΘT_{FT}) и области, расположенной выше тропопаузы (ΘT_{TP}) [6]. Вариации ΘT_{FT} и ΘT_{TP} перед землетрясениями 16 января 2004 г., 05 октября 2008 г., 18 марта 2011 г. и 14 ноября 2014 г., показаны на рисунке 1.

Выбор расположенного над тропопаузой высотного диапазона, в котором производится усреднение значений аномалий температуры, является ситуативным и, что важно, в каждом случае строится на визуальном и корреляционном сравнении поведения ΘT на каждом изобарическом уровне (p_k) в интервале 250–100 hPa. Обусловленные литосферными процессами возмущения в области инверсионного распределения температуры диагностировались, как произведение значений скользящей дисперсии временных рядов $D_{\Theta T}^{FT}$ и $D_{\Theta T}^{TP}$ [5]. Предложенная методика показала адекватные результаты и позволила исследовать особенности трансформации вертикальной структуры атмосфе-

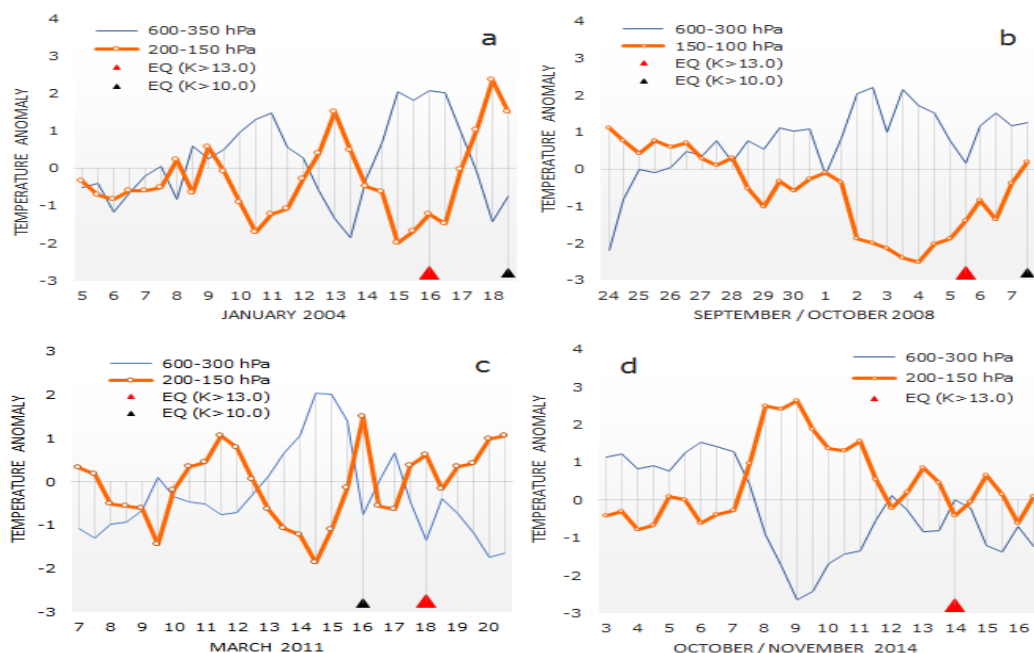


Рисунок 1 – Вариации аномалий температуры $\theta_{T_{FT}}$ и $\theta_{T_{TP}}$ перед землетрясениями: (а) – 16 января 2004 г.; (б) – 05 октября 2008 г.; (с) – 18 марта 2011 г.; (д) – 14 ноября 2014 г.

ры. В то же время, с учетом сложного характера атмосферных эффектов землетрясений, для повышения надежности идентификации аномалий необходима коррекция некоторых положений, относящихся к обработке временных рядов, формированию наборов экспериментальных данных и расширению круга используемых параметров. Обновленная методика включает фильтрацию низкочастотной составляющей спектра вариаций температуры на каждом уровне атмосферы и увеличение временного разрешения исходных данных ($\Delta t = 3$ часа). Также реализован комплексный подход с привлечением дополнительных, взаимосвязанных с температурой метеорологических параметров: относительной влажности и атмосферного давления. Важной составляющей при этом стало создание базы сейсмических данных и результатов спутниковых измерений.

Используемые данные. Для анализа временных и высотных вариаций параметров атмосферы использовались данные спутниковых измерений (*AIRS/Aqua*, *MERRA 3D*) на 23-х изобарических уровнях (p_k) от 800 hPa до 10 hPa [8]. Вертикальные профили температуры $T(p_k)$ и относительной влажности $RH(p_k)$, а также временные серии атмосферного давления на уровне тропопаузы (*Tropo-Press* или p_{TP}) были восстановлены над каждым

участком размером $\pm 1^\circ$ от эпицентров землетрясений для временных периодов, составляющих 30–60 дней до и 15–30 дней после каждого из рассматриваемых событий. Выбранное время регистрации соответствует утренним (06:00 LT) и вечерним (18:00 LT) часам местного времени, что позволило ослабить суточную составляющую и сохранить особенности изменчивости параметров в периоды сейсмической активности, сведения о которой взяты из каталога землетрясений Института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке по данным сети *KNET* [2]. Выполненное в рамках данной работы исследование ограничено периодами подготовки и прохождения следующих сейсмических событий: *EQ02*: $K = 13.68$ (16 января 2004 г.); *EQ07*: $K = 13.25$ (05 октября 2008 г.); *EQ09*: $K = 13.00$ (18 марта 2011 г.); *EQ11*: $K = 13.21$ (05 февраля 2012 г.); *EQ12*: $K = 13.46$ (23 ноября 2013 г.); *EQ13*: $K = 13.98$ (14 ноября 2014 г.) [6].

Аномалии температуры в области тропопаузы. Обработка профилей температуры атмосферы ($T(p)$), восстановленных с более высоким временным разрешением ($\Delta t = 3$ часа), позволила детально проанализировать динамику изменения аномалий температуры $\theta T(t)$ накануне и после сильного сейсмического события, произошедшего

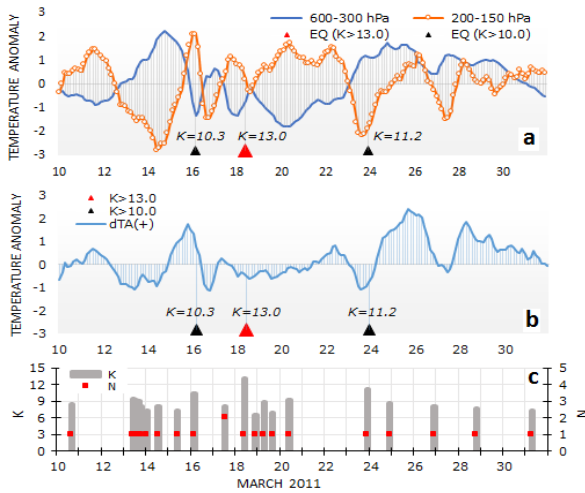


Рисунок 2 – Временные ряды температурных аномалий ΘT_{FT} и ΘT_{TP} (a), результирующей вариации ΘT_{Σ} (b), сейсмической активности (c) в марте 2011 г. (K – энергетический класс землетрясений и N – количество сейсмических толчков в указанные сутки)

18 марта 2011 года ($EQ09$). На рисунке 2, а показаны временные ряды средних значений ΘT_{FT} и ΘT_{TP} , для которых произведения значений скользящей дисперсии значительно превышали единицу (параметр $D_{\Theta T}$ составлял ~ 8.0 и ~ 2.0 за 1–2 дня до наступления сейсмических событий 18 и 24 марта 2011 г., соответственно) [6, 7]. При всех амплитудных и фазовых различиях в колебаниях температуры отличительной особенностью периода подготовки основного сейсмического удара (15–18 марта 2011 г.) являлись относительно быстрые, волнообразные, противофазные изменения ΘT_{FT} и ΘT_{TP} с амплитудой 3–5 °К и периодом ~ 48 часов. Подобные атмосферные отклики в виде выбросов, направленных по вертикали в противоположные стороны, являются характерным признаком возбуждения акустических и внутренних гравитационных волн в тропосфере [9, 10].

Процесс изменения фазы колебаний ΘT_{FT} и ΘT_{TP} иллюстрирует график, приведенный на рисунке 2, б:

$$\Theta T_{\Sigma}(t) = \Theta T_{FT}(t) + \Theta T_{TP}(t).$$

Как видно, по мере приближения землетрясения $EQ09$ разность фаз ΘT_{FT} и ΘT_{TP} достигает $\pi/2$, поэтому результирующее колебание становится минимальным вследствие вычитания амплитуд разного знака. В тоже время графики разности аномалий температуры (рисунок 3) в сво-

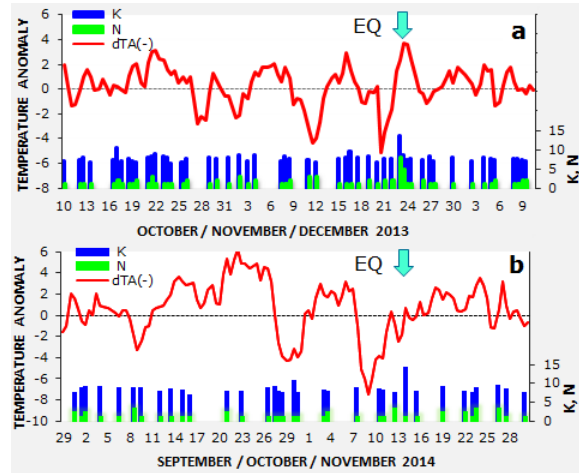


Рисунок 3 – Временные ряды разности температурных аномалий ΘT_{FT} и ΘT_{TP} (с вычетом тренда) и сейсмическая активность в 2013 (a) и 2014 (b)

бодной тропосфере и над тропопаузой показали наличие значительных вариаций с возрастающей амплитудой, которые начинались примерно за месяц до землетрясения и быстро уменьшались до полного исчезновения после него.

Вариации давления атмосферы на уровне тропопаузы. Анализ многолетних спутниковых данных показал, что наиболее сильным землетрясениям ($K > 10.0$) часто предшествовало резкое изменение температуры на уровне тропопаузы, фактически означающее перепады атмосферного давления. Между изменениями $T(t)$ и $p(t)$ существует тесная корреляционная зависимость. Совместный анализ временных рядов аномалий температуры на изобарическом уровне 150 hPa, давления (p_{TP}) и сейсмической активности в период с 28 ноября 2011 г. по 25 февраля 2012 г., указывает на согласованность изменений процессов в земной коре и атмосфере (рисунок 4). Как видно, наиболее сильные землетрясения происходили после быстрого (в течение 1–3 суток) перепада давления ($\Delta p = 30\text{--}120$ hPa), однако при этом не просматривается связи между величиной Δp и энергетическим классом землетрясения.

Как отмечалось в опубликованных ранее работах, напр., в [11], резкие колебания атмосферного давления над значительными площадями земной поверхности вследствие развития циклонических процессов в атмосфере и распростране-

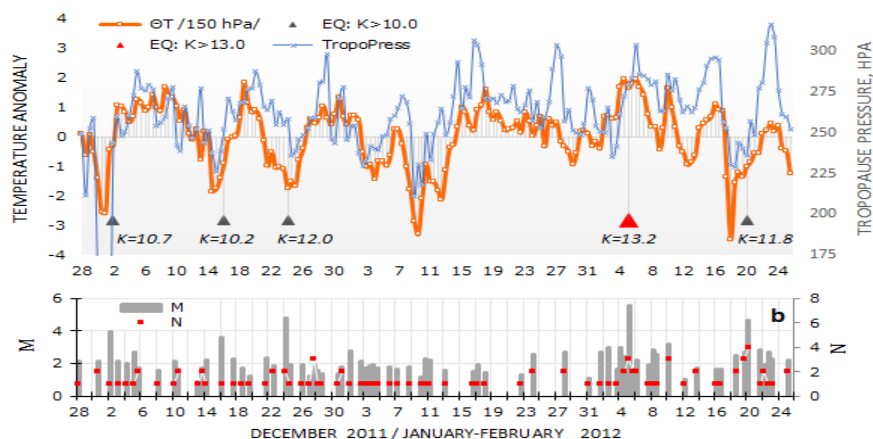


Рисунок 4 – Вариации аномалий температуры ($\Theta T / 150 \text{ hPa}$), давления на уровне тропопаузы ($TropoPress$) (а) и сейсмическая активность (b) в период с 28 ноября 2011 г. по 25 февраля 2012 г. (M – магнитуда)

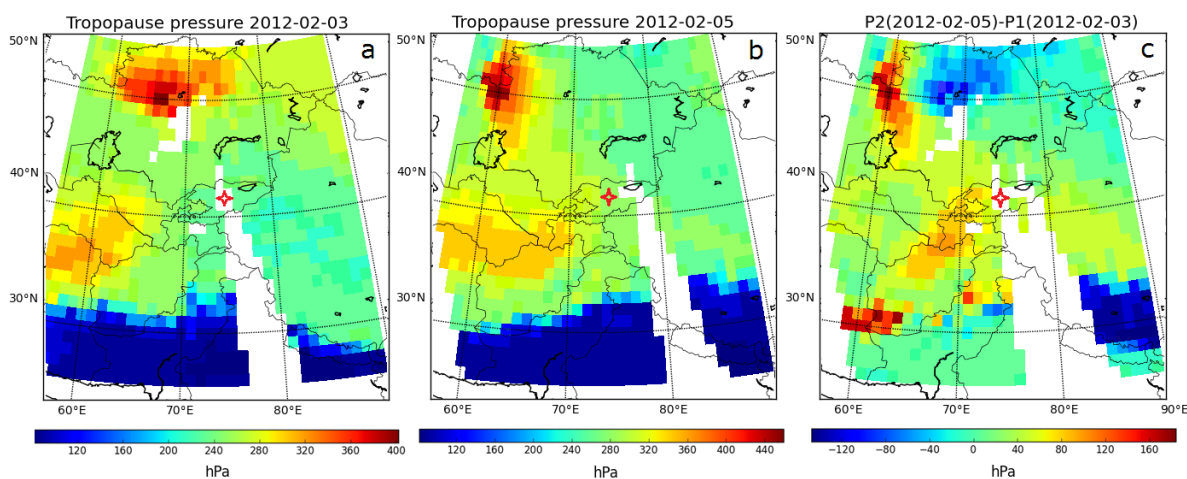


Рисунок 5 – Пространственное распределение давления на уровне тропопаузы ($TropoPress$) 03 февраля (а), в день землетрясения 05 февраля (b) 2012 г. и разности давления между этими двумя датами (с)

ния атмосферных фронтов могут проявляться не только в вариациях геофизических полей, но также нарушениях в ряде случаев геодинамического режима земной коры и изменении сейсмического режима. Таким образом, перемещение областей высокого и низкого атмосферного давления может рассматриваться в качестве тектонического фактора, обуславливающего многократные квази-периодические наклоны и изгибы земной поверхности, процессы накопления деформаций и напряжений, а значит способного ускорить возникновение землетрясения, назревающего в земной коре независимо от атмосферных процессов. На рисунке 5 показаны карты пространственного распределения давления на уровне тропопаузы за

два дня (03 февраля 2012 г.) и в день землетрясения (05 февраля 2012 г.) и перепада давления между этими двумя датами. Явно выраженные зоны положительных ($\Delta p = 150 \text{ hPa}$) и отрицательных ($\Delta p = -120 \text{ hPa}$) барических градиентов на широтах $50^\circ N$ и $30^\circ N$, соответственно, располагались симметрично и равноудаленно относительно эпицентра землетрясения.

Трансформация вертикальных профилей относительной влажности. Одним из направлений развития методики диагностирования атмосферных эффектов землетрясений было исследование поведения профилей относительной влажности, характеризующих степень насыщения воздуха водяным паром. Несмотря на то, что каждое

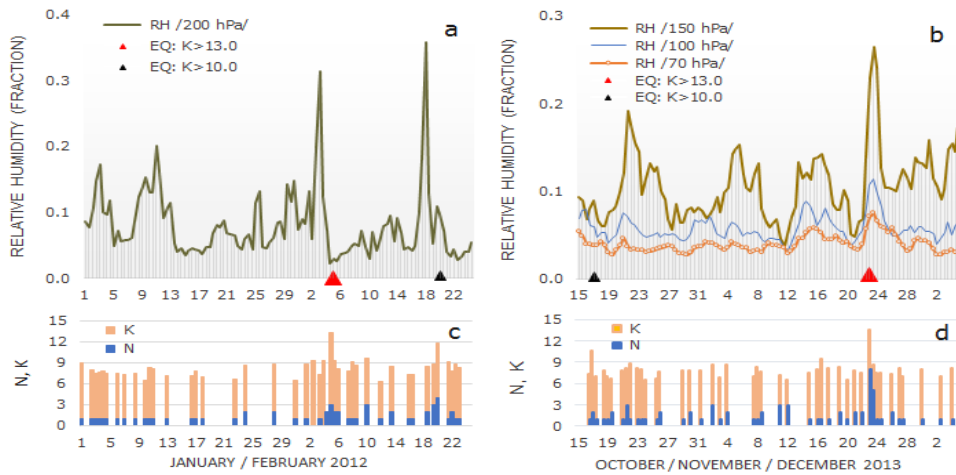


Рисунок 6 – Вариации относительной влажности в области тропопаузы и сейсмическая активность с 01 января по 25 февраля 2012 года (а, с) и с 15 октября по 05 декабря 2013 года (b, d)

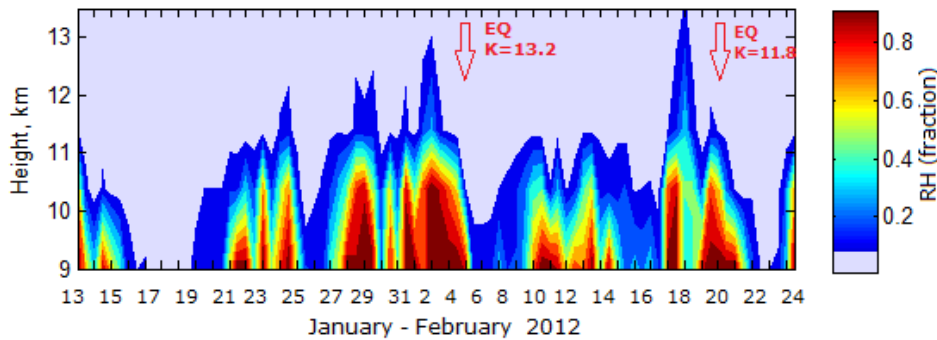


Рисунок 7 – Высотно-временное распределение относительной влажности в период сейсмической активности с 13 января по 24 февраля 2012 г.

землетрясение, как правило, имеет свои индивидуальные свойства, и наблюдаемые изменения не являются полностью идентичными [12], были выявлены общие черты атмосферных аномалий RH , наблюдаемых до землетрясений. Полученные данные показали резкое увеличение относительной влажности (выраженные в долях единиц) на изобарических поверхностях от 200 до 70 hPa , достигающее максимальных значений 0.25–0.40 за 1–3 дня до сейсмических толчков 05 и 20 февраля 2012 г. (рисунок 6, а) и 23 ноября 2013 г. (рисунок 6, б). Заметное сходство, проявляющееся в поведении аномальных вариаций RH перед сильными землетрясениями, может объясняться общностью физического механизма возникновения [12], обусловившего появление наблюдаемых возмущений.

Пространственно-временное распределение относительной влажности показало, что длитель-

ность аномальных вариаций составляла порядка 1,5–3 дней, а наиболее сильные сейсмические удары происходили по заднему или переднему фронту наблюдаемых в области тропопаузы пиков RH (рисунки 6 и 7).

Заключение. Проанализировано поведение метеорологических параметров атмосферы, измеренных космическими средствами дистанционного зондирования Земли (*MERRA-3D*, *AIRS/Aqua*), в периоды подготовки землетрясений с энергетическим классом $K \geq 13.0$. Анализ аномалий температуры, давления и относительной влажности, предшествующих и сопутствующих сильным сейсмическим событиям показал, что накануне землетрясений в атмосфере происходят процессы, которые, очевидно, имеют непосредственную с ними связь. Накануне большинства сейсмических событий (~70 %), произошедших в регионе

в 2003–2015 гг., наблюдалось резкое изменение параметров атмосферы в зоне раздела тропосферы и стратосферы.

Авторы выражают благодарность руководителям и сотрудникам научных проектов MER-RA-3D и AIRS/Aqua за организацию наблюдений, обработку результатов измерений и обеспечение свободного доступа к данным, используемым в настоящем исследовании.

Литература

1. *Свердлик Л.Г.* Динамика температуры тропосферы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации. 2015. №1. С. 23–27.
2. *Имашев С.А.* Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. / С.А. Имашев, Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2015. №1. С. 15–19.
3. *Sverdlik L.G.* Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L.G. Sverdlik, B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoilova // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering 20. Atmospheric Physics. 2014. С. 92923J.
4. *Свердлик Л.Г.* Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2014. №4. С. 26–31.
5. *Свердлик Л.Г.* Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КPCУ. 2016. Т. 16. № 5. С. 170–174.
6. *Свердлик Л.Г.* Результаты диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КPCУ. 2016. Т. 16. № 9.
7. *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.
8. The NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. URL: <http://giouvanni.gsfc.nasa.gov/>.
9. *Свердлик Л.Г.* Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.
10. *Кашкин В.Б.* Внутренние гравитационные волны в тропосфере / В.Б. Кашкин // Оптика атмосферы и океана. 2013. 26. № 10. С. 908–916.
11. *Адушкин В.В.* Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре / В.В. Адушкин, Д.Н. Локтев, А.А. Спивак // Физика земли. 2008. № 6. С. 77–85.
12. *Dunajevka M.A.* Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in México / M.A. Dunajevka, S.A. Pulinets // Atmosfera. 2005. Vol. 18. No. 4. 235–247.