

УДК 551.507: 551.524: 550.34

ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ  
НАД СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ РЕГИОНАМИ АЗИИ

*Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев*

Представлены результаты диагностирования аномалий температуры, основанные на ретроспективном анализе долговременных спутниковых данных в зоне раздела тропосферы и стратосферы над эпицентрами 10 сильных землетрясений магнитудой  $M > 6,5$ , произошедших в различных сейсмически активных регионах Азии. Аномальные возмущения температуры наблюдались во всех рассмотренных случаях за 1–8 дней до основного сейсмического события.

*Ключевые слова:* землетрясение; спутниковые данные; атмосфера; температура; тропопауза; аномалии; уходящая длинноволновая радиация.

---

VARIATIONS OF UPPER TROPOSPHERE TEMPERATURE  
OVER SEISMICALLY ACTIVE REGIONS OF ASIA

*L.G. Sverdlik, SA. Imashev*

The results of diagnosis of temperature anomalies based on retrospective analysis of long-term time-series of temperature in separation zone of troposphere and stratosphere over epicenters of 10 strong earthquakes with magnitude of  $M > 6.5$  that occurred in different seismically active regions of Asia are presented. Anomalous temperature perturbations were observed in all the studied cases 1-8 days before the main seismic event.

*Keywords:* earthquake; satellite data; atmosphere; temperature; tropopause; anomalies; outgoing long-wave radiation.

**Введение.** Одним из направлений комплексного мониторинга сейсмоактивных областей и взаимодействия геосфер является установление связи между динамикой литосферных и атмосферных процессов при землетрясениях. При этом современной тенденцией при детектировании аномальных возмущений в атмосфере, связанных с сейсмической активностью, является использование средств спутникового дистанционного зондирования, к основным достоинствам которых можно отнести глобальность охвата, регулярность получения данных, возможность исследования пространственно-временной структуры различных параметров атмосферы, в том числе температуры. Тепловые аномалии перед сильными землетрясениями отмечались на разных уровнях, начиная от поверхности земли до верхней границы облаков, и неоднократно регистрировались многими исследователями [1, 2], однако результаты подобных исследований не всегда оказывались однозначными [3].

Между тем, как показали данные спутниковых измерений, в разделенных тропопаузой слоях атмосферы, характеризующихся различным поведе-

нием градиента температуры, динамика изменения амплитуды и фазы флуктуаций температуры имеет достаточно устойчивую связь с вариациями сейсмичности [4]. Эти тропосферные эффекты, которые могут быть использованы для краткосрочных прогнозов крупных сейсмических событий, отчетливо проявлялись в период катастрофического землетрясения в Японии весной 2011 г. [5, 6], а также накануне относительно сильных сейсмических событий в Северном Тянь-Шане [7–9]. Основная задача настоящей работы состояла в дополнительной проверке эффективности разработанной авторами методики диагностирования возмущений температуры в области тропопаузы на примере сильных землетрясений, произошедших в сейсмически активных регионах Азии.

**Сейсмические и спутниковые данные.** В соответствии с поставленной задачей на основе данных интерактивного сервиса *IEB* [10] был сформирован набор сейсмических данных из числа землетрясений с магнитудами  $M > 6,5$ , произошедших в Азии в 2011–2015 гг., для которых доступны результаты спутниковых измерений в системе

Таблица 1 – Характеристики исследуемых сейсмических событий ( $M > 6.5$ )

№	Date	Time	Latitude N	Longitude E	M	Region
EQ01	19.08.1992	18:11:18	42.07	73.63	7.4	Kyrgyzstan, Suusamyr
EQ02	27.12.2011	15:21:56	51.84	95.91	6.6	Russia, Tuva
EQ03	26.02.2012	06:17:19	51.71	95.99	6.7	Russia, Tuva
EQ04	11.04.2012	08:38:36	02.33	93.06	8.6	Indonesia, Sumatra Isl.
EQ05	24.09.2013	11:29:48	27.00	65.51	7.7	Pakistan, Baluchistan
EQ06	12.02.2014	09:19:49	35.92	82.56	6.8	China
EQ07	25.04.2015	06:11:26	28.15	84.71	7.8	Nepal
EQ08	16.02.2015	23:06:27	39.83	142.89	6.7	Japan, Honshu Island
EQ09	12.05.2015	21:12:58	38.90	142.03	6.8	Japan, Honshu Island
EQ10	30.05.2015	02:21:27	27.83	140.49	7.8	Japan, Ogasawara Isl.

визуализации и анализа *GIOVANNI* [11]. Были проанализированы температурные данные в периоды подготовки 9 землетрясений с магнитудами от 6.6 до 8.6, зарегистрированных в различных географических зонах с высокой сейсмической опасностью от экватора до средних широт (таблица 1). Рассмотрено также сильнейшее за последние десятилетия сейсмическое событие в Кыргызстане (Суусамыр; 19.08.1992;  $M = 7.4$ ), сведения о котором взяты из каталога землетрясений [12].

Временные серии температуры  $T(t)$  с 3-х часовым разрешением по времени ( $\Delta t = 3h$ ) были восстановлены по данным спутниковых измерений на 10 изобарических уровнях от 500 до 70 hPa над каждым участком размером  $\pm 1^\circ$  от эпицентров землетрясений [10]. Продолжительность рядов наблюдений составляла 12 месяцев для EQ01 и 2–3 месяца до и после каждого из остальных рассматриваемых событий EQ02–EQ10.

**Методика обработки временных рядов температуры верхней тропосферы.** Временная динамика аномалий температуры ( $\Theta T$ ) на каждом изобарическом уровне рассчитывалась как откло-

нение текущего значения температуры от средне-месячного уровня ( $\Delta T$ ), нормированное на средне-квадратичное отклонение ( $\sigma_T$ ). Полученные ряды  $\Theta T(t)$ , которые усреднялись в свободной тропосфере ( $\Theta T_{FT}$ ) и области, расположенной выше тропопаузы ( $\Theta T_{TP}$ ), характеризовались противофазными изменениями  $\Theta T$  вследствие различия поведения градиента температуры ( $\gamma_{FT} = \Delta T/\Delta p < 0$ ;  $\gamma_{TP} = \Delta T/\Delta p > 0$ ). Преобразование временных рядов  $\Theta T_{FT}$  и  $\Theta T_{TP}$  выполнялось с использованием метода скользящего “окна”, основанного на представлении каждого члена ряда в виде дисперсии некоторого числа ( $m$ ) предыдущих значений. Размер “окна” принимался равным  $m = 6$ , что позволило анализировать присутствующие в спектре колебаний короткопериодные вариации температуры, период которых составляет ~5–8 дней. Вейвлет-спектрограммы (рисунок 1) отчетливо выделяют вариации подобного временного масштаба перед крупными землетрясениями.

Диагностирование возмущений температуры основано на расчетах произведения скользящих дисперсий временных рядов аномалий

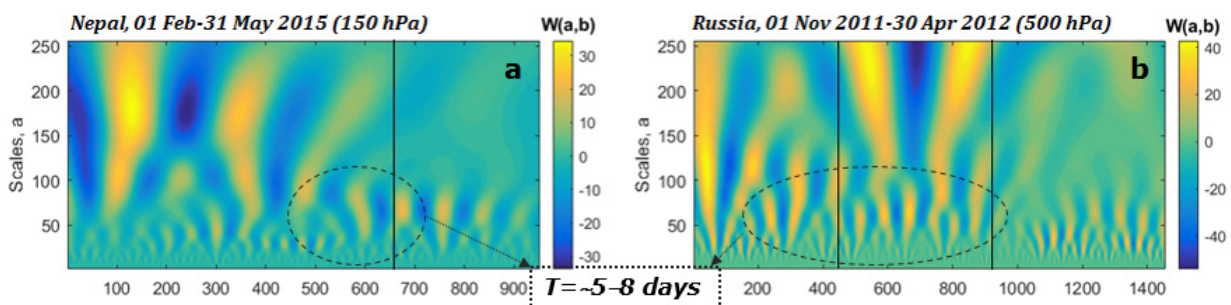


Рисунок 1 – Вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры ( $\Delta t = 3h$ ) в периоды сейсмической активности в Непале (150 hPa) (а) и в России (500 hPa) (б). Вертикальными линиями показаны моменты сильных землетрясений

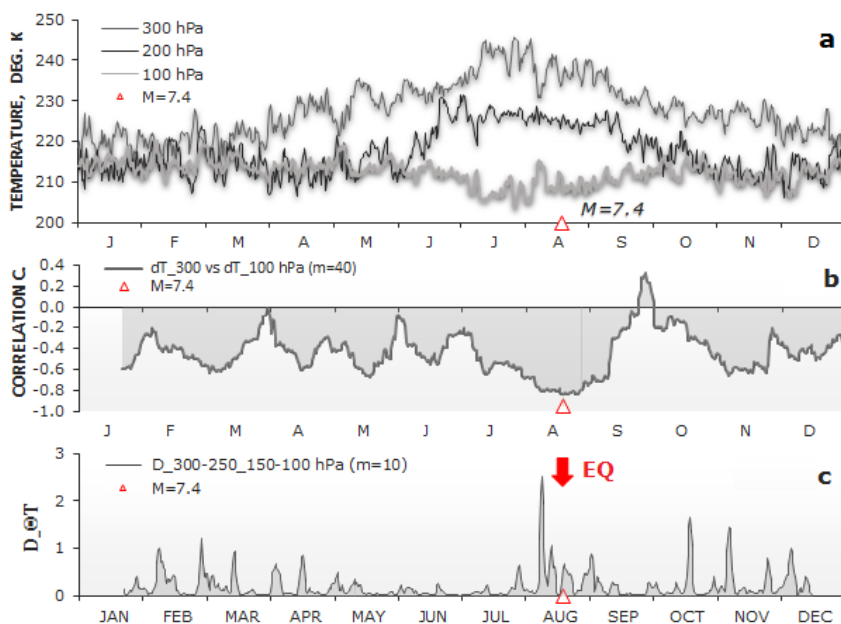


Рисунок 2 – Динамика изменения: температуры на изобарических уровнях 300, 200 и 100 hPa (а); корреляционной связи между  $\Delta T$  для одного момента времени (б); параметра  $D$  (с) в 1992 г. (маркером отмечен момент землетрясения  $M = 7,4$  19 августа 1992 г.)

температуры в свободной тропосфере и над тропопаузой:

$$D = D_{\Theta T}^{FT} \cdot D_{\Theta T}^{TP}$$

Параметр  $D$  значительно превышает единицу при больших значениях  $D_{\Theta T}^{TP}$ , но существенно меньше единицы в отсутствии флуктуаций температуры, когда естественная изменчивость не выходит за пределы среднемесячных значений ( $\Delta T < \sigma_T$ ), или при воздействии случайных факторов. Данная методика была ранее апробирована на серии сейсмических событий энергетического класса  $K \geq 13.0$ , произошедших в Северном Тянь-Шане в 2003–2015 гг., показав, что аномальные возмущения температуры в области тропопаузы над эпицентрами предстоящих землетрясений наблюдались примерно в 70 % случаев [7, 8].

#### Обсуждение результатов

##### диагностирования аномалий температуры

**Суусамырское землетрясение ( $M = 7.4$ ).** 19 августа 1992 г. в Северном Тянь-Шане было зарегистрировано сильнейшее за последние десятилетия землетрясение магнитудой  $M = 7.4$ , с которого началась интенсивная активизация сейсмичности. Основное сейсмическое событие сопровождалось большим количеством афтершоков (636 и 527 сейсмических событий в августе и сентябре, что больше обычной годовой нормы). Вариации температуры на изобарических уровнях от 300 до 100 hPa в 1992 г.

показаны на рисунке 2, а. Корреляционная связь между временными рядами приращения температуры  $\Delta T = T(t_{i+1}) - T(t_i)$  на уровнях 300 и 100 hPa, рассчитанными для одного и того же момента времени в скользящем окне  $m = 20$  дней, показана на рисунке 2, б. Повышение локальных коэффициентов корреляции до  $R = -0.84$  перед сильным сейсмическим ударом связано как с увеличением амплитуды флуктуаций температуры, так и с синхронностью изменений температуры.

Сразу после землетрясения следовало резкое снижение согласованности внутренней динамики рядов, продолжавшееся более двух месяцев. Результаты диагностирования аномалий температуры (параметр  $D$ ) в разделенных тропопаузой слоях 300–250 и 150–100 hPa демонстрируют область высоких значений  $D = 2.5$  за 8–9 суток до землетрясения (рисунок 2, с). Таким образом, очевидно совпадение по времени единственной за год хорошо выраженной аномалии температуры с периодом подготовки сильного землетрясения.

**Аномалии уходящей длинноволновой радиации.** Дополнительно для независимого подтверждения образования тепловых аномалий накануне сильного землетрясения были построены карты пространственного распределения среднесуточных значений уходящей длинноволновой радиации (OLR) [13]. На основании этих данных, определяли

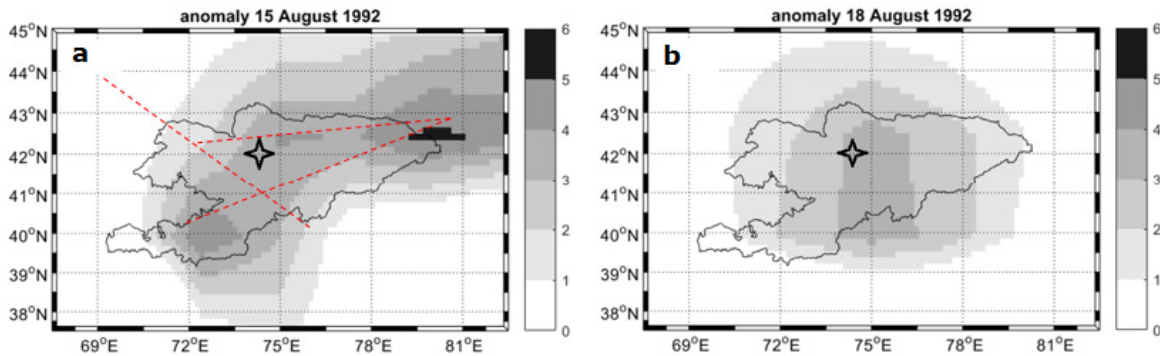


Рисунок 3 – Пространственное распределение аномалий уходящей длинноволновой радиации вблизи эпицентра землетрясения: а – 15 августа; б – 18 августа 1992 г.

зональные аномалии для каждого пиксела, как отклонение текущего значения от среднего уровня за предыдущий 5-летний период (1987–1991 гг.) [14]. Расчеты показали, что аномалия OLR, наблюдаемая 15 августа 1992 г., превышала уровень  $2\sigma$  и примерно повторяла расположение активных региональных разломов (показаны пунктирными линиями), вытянутых в широтном направлении (рисунок 3, а). Спустя трое суток, за 1 день до землетрясения (18 августа 1992 г.) аномалия уходящей длинноволновой радиации была зарегистрирована вблизи эпицентра основного сейсмического удара (рисунок 3, б), что согласуется с аналогичными результатами, полученными ранее для Тянь-Шаньских землетрясений [7].

**Землетрясения магнитудой  $M \geq 6.5$  в сейсмически активных регионах Азии.** Особенности теплового режима верхней тропосферы в рассматриваемых сейсмически активных регионах Азии характеризовались существенными различиями, которые определялись, вероятно, интегрированным эффектом физических процессов, развивающихся в атмосфере, и условиями земной поверхности. Одним из таких влияющих факторов являлась, вероятно, и сейсмическая активность. Однако, несмотря на амплитудные и фазовые различия вариаций температуры в области тропопauses, применение методики позволило выявить закономерности, характерные для всех рассматриваемых событий. В качестве примера на рисунке 4

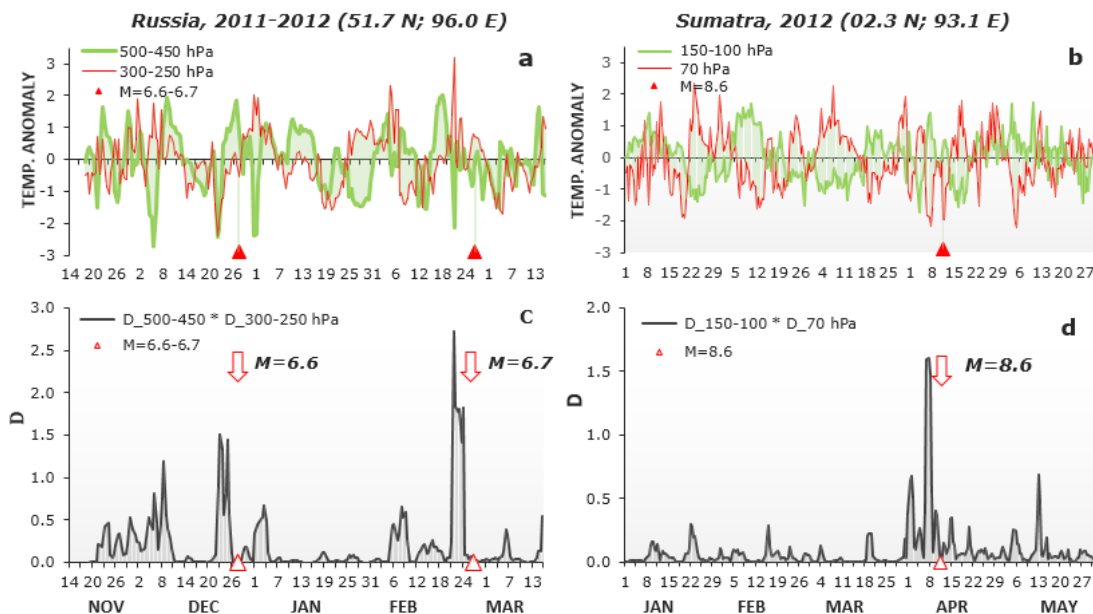


Рисунок 4 – Временная динамика средних значений аномалий температуры в указанных слоях (а, б) и параметра D (с, д) в России (с 14 ноября 2011 г. по 15 марта 2012 г.) и на Суматре (с 01 января по 31 мая 2012 г.)



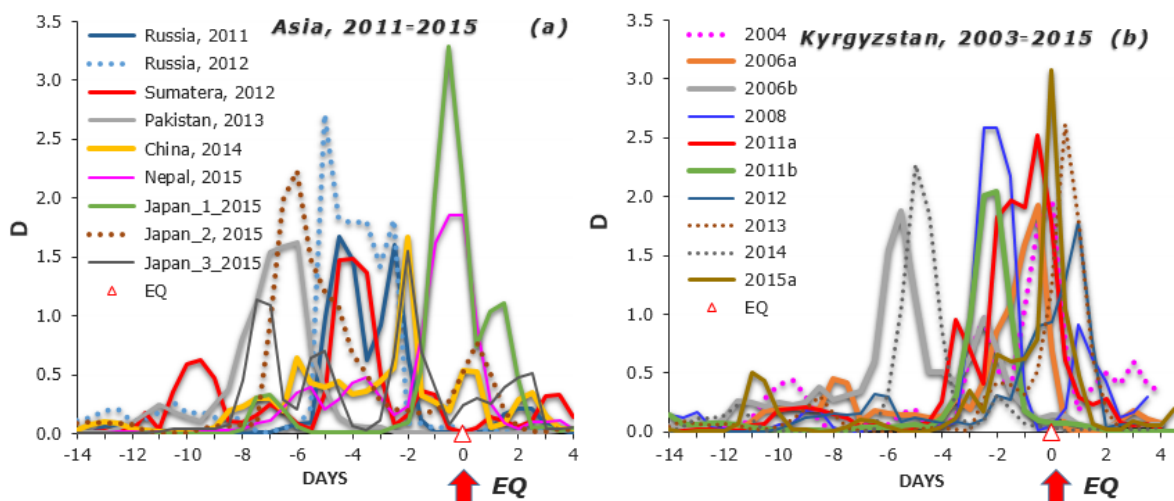


Рисунок 5 – Результаты диагностирования аномалий температуры атмосферы ( $D$ ) перед землетрясениями в Северном Тянь-Шане ( $K \geq 13,0$ ) в 2003–2015 гг. (a) и в сейсмически активных регионах Азии ( $M > 6,5$ ) в 2011–2015 гг. (b)

представлены временные ряды средних значений аномалий температуры в указанных слоях (верхние рисунки) и произведения скользящих дисперсий ( $D$ ), рассчитанные по  $m = 6$  предшествующим значениям для землетрясений в России ( $M = 6,6-6,7$ ) и на Суматре ( $M = 8,6$ ) в зимний и весенний периоды 2011–2012 гг.

Как видно, области наиболее высоких значений параметра  $D$  коррелировали с основными сейсмическими ударами. При этом четко выраженные аномалии температуры начинали проявляться за несколько дней до сильных землетрясений и пропадали практически сразу после этих событий.

Результаты диагностирования аномалий  $T(t)$ , сведенные вместе, и приведенные к одному моменту землетрясения, показаны на рисунке 5, а в виде вариаций параметра  $D$ . Для сравнения приведены аналогичные данные по землетрясениям энергетического класса  $K > 13,0$  в Тянь-Шане в 2003–2015 гг. (рисунок 5, b). Очевидно, что оба графика демонстрируют подобное поведение областей высоких значений параметра  $D$ , которые либо совпадают с сейсмическими ударами, либо предваряют их.

В общем случае эти области соответствуют более интенсивным и коррелированным колебаниям в разделенных тропопаузой слоях атмосферы в течение промежутка времени, определяемого размером скользящего окна, примерно соответствующего полупериоду анализируемой компоненты спектра вариаций температуры (3–4 суток). Критерием аномального поведения температуры во всех рассмот-

ренных случаях являлись значения интегрального показателя  $D$ , превышающие 1.5. Этот параметр может быть использован в качестве краткосрочного предвестника сильного землетрясения.

**Заключение.** Анализ спутниковых данных показал, что возникновению рассматриваемой выборки 10 сильных сейсмических событий ( $M > 6,5$ ) в различных регионах Азии, предшествовало аномальное изменение температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы, которое проявлялось за 1–8 дней до основного толчка. Принимая во внимание существенные отличия эпицентров землетрясений по широте и условиям земной поверхности, которые определяют особенности теплового режима атмосферы, разработанная методика показала приемлемую эффективность диагностирования аномалий температуры.

Несмотря на положительную статистику результатов диагностирования аномалий температуры в верхней тропосфере пока преждевременно утверждать, что они распространяются на все крупные сейсмические события, соответственно, необходимо проведение дополнительных исследований. Главной целью этих исследований, наряду с расширением статистики, станет построение модели, показывающей, каким образом процессы, происходящие при подготовке землетрясений, вызывают аномальные колебания температуры в верхней тропосфере и противофазные колебания в тропопаузе.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC за обеспечение свободного

доступа к данным спутниковых измерений, использованным в работе.

### Литература

1. Пулинец С.А. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера-Магнитосфера, инициируемых ионизацией / С.А. Пулинец, Д.П. Узунов, А.В. Карелин, Д.В. Давиденко // Геомагнетизм и Аэронаука. 2015. Том 55. № 4. С. 1–19.
2. Jing F. Variations of multi-parameter observations in atmosphere related to earthquake / F. Jing, X.H. Shen, C.L. Kang, P. Xiong // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. 13. P. 27–33.
3. Prakash R. Thermal anomalies in relation to earthquakes in India and its neighbourhood / Prakash R., Srivastava H.N. // Current Science. 2015. V. 108. № 11. P. 2071–2082.
4. 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 // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 2. С. 220–228.
5. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере / В.Б. Кашкин // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
6. 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.
7. Свердлик Л.Г. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 783–793.
8. Свердлик Л.Г. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КPCY. 2016. Т. 16. № 5. С. 170–174.
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. The IRIS Earthquake Browser (IEB). URL: <http://ds.iris.edu/>
11. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>
12. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
13. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/>
14. Venkatanathan N. Outgoing longwave radiations as pre-earthquake signals: preliminary results of 24 September 2013 earthquake (M 7.7) / N. Venkatanathan, V. Natyaganov // Current Science. 2014. V. 106. № 9. P. 1291–1297.