

О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы

© 2019 Л. Г. Свердлик*, С. А. Имашев

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан

*E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Представлен алгоритм диагностирования короткопериодных аномальных изменений температуры в области тропопаузы и результаты ретроспективного анализа спутниковых временных рядов температуры над эпицентрами землетрясений магнитудой $M > 6.0$, произошедших в сейсмически активном Средиземноморском регионе Европы. Показана эффективность использования алгоритма для обнаружения тропосферных эффектов, предшествующих сильным землетрясениям. Установлено, что аномальные возмущения температуры наблюдались во всех рассмотренных случаях за 1–10 дней до основного сейсмического события.

Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, атмосфера, аномалии температуры, тропопауза.

On preseismic anomalies of atmosphere temperature

Leonid G. Sverdlik*, Sanjar A. Imashev

Research Station of RAS in Bishkek City, Kyrgyzstan

*E-mail: l.sverdlik@mail.ru

An algorithm for recognition of short-period anomalous temperature changes in tropopause region has been presented, as well as the results of a retrospective analysis of satellite based temperature time-series over epicenters of earthquakes with $M > 6.0$ magnitudes that occurred in seismically active Mediterranean region in Europe. The algorithm showed efficiency for detecting tropospheric effects preceding strong earthquakes. It has been stated that the anomalous temperature disturbances were observed in all considered cases 1–10 days before the main seismic event.

Keywords: earthquake, satellite data, atmosphere, temperature anomalies, tropopause.

Введение

Проблема прогноза сильных землетрясений, этих наиболее разрушительных по последствиям природных явлений, остается одной из нерешенных проблем в геофизике. К настоящему времени выполнено большое количество исследований на основе наземных и спутниковых наблюдений. В результате предложены разнообразные способы прогнозирования сейсмической активности, основанные на регистрации аномального поведения различных характеристик как в земной коре и приповерхностной литосфере, так и в атмосфере, включая ее верхнюю об-

ласть – ионосферу [Tronin, 2010]. Важнейшей задачей идентификации аномалий во временных рядах (пространственных изображениях), наряду с выбором параметров – потенциальных признаков подготовки сильных землетрясений, является поиск и использование наиболее эффективных методов обработки экспериментальных данных.

Разработано множество методов и алгоритмов выделения аномалий для различных типов данных, которые описывают процессы, протекающие во времени и предшествующие землетрясениям [Saradjian, Akhoondzadeh, 2011; Bhardwaj et al., 2017; Wu et al., 2016],

начиная с простых методов визуальной интерпретации и кончая более сложными, основанными на вейвлет-преобразовании [Jiao et al., 2018], а также на совместном применении вейвлетов и нейронных сетей. Наиболее широко применяется для обнаружения и локализации отклонений соответствующих параметров от типичного поведения методика анализа спутниковых данных RST (robust satellite techniques). Этот метод использует статистические характеристики исторических данных в сейсмически активных областях для детектирования возможных предсейсмических аномалий, которые определяют в данном случае как превышающие некоторый порог отклонения текущего наблюдаемого значения от долгосрочного среднего уровня [Tramutoli et al., 2001; Свердлик, Имашев, 2017]. Метод RST применим к различным условиям атмосферы и земной поверхности, а также к различным спутниковым наблюдениям, он позволяет уменьшить вероятность фиксации ложных аномалий [Jiao et al., 2018].

Общие принципы универсального метода RST в комбинации со спектральным и корреляционным анализом легли в основу разработанного авторами алгоритма, который, в отличие от традиционных методов, дополнен специализированным модулем диагностирования короткопериодных аномалий исследуемых временных рядов [Свердлик, Имашев, 2017]. Выполненный с применением этого алгоритма ретроспективный анализ данных спутникового дистанционного зондирования показал наличие корреляционной связи между сейсмической активностью и аномальными вариациями температуры в верхней тропосфере как над сушей, так и над океаном в период катастрофического землетрясения в Японии весной 2011 г. [Кашкин, 2013; Имашев, Свердлик, 2015], а также накануне сильных сейсмических событий на территории России [Кашкин и др., 2012], в Северном Тянь-Шане [Свердлик, Имашев, 2017] и других сейсмически активных регионах Азии от экватора до средних широт [Свердлик, Имашев, 2018]. Несмотря на общую положительную статистику выделения предшествующих сильным землетрясениям аномалий температуры, была

очевидна необходимость более тщательной дополнительной проверки, подтверждения и уточнения выявленного тропосферного эффекта. А соответственно, и проведения дополнительных исследований, главной целью которых, наряду с развитием и совершенствованием алгоритма диагностирования аномальных возмущений температуры в области тропопаузы, стало бы расширение статистики связанных с ними крупных землетрясений.

В настоящей работе мы представляем модифицированную версию разработанного ранее [Свердлик, Имашев, 2017] алгоритма, который позволяет диагностировать короткопериодные аномальные изменения пространственно-временного распределения температуры. Также приводим результаты, полученные с использованием разработанных программных модулей на примере крупных землетрясений магнитудой $M > 6.0$ в Средиземноморском регионе Европы.

Исходные сейсмические и спутниковые данные

Для изучения тепловых изменений в атмосфере, происходящих до и после сильных землетрясений, был сформирован набор сейсмических данных для 8 землетрясений с магнитудами от 6.1 до 7.1, которые были зарегистрированы в 2011–2016 гг. в Турции, Италии, Греции и Эгейском море (см. таблицу и рис. 1). Основой послужили данные интерактивного сервиса IRIS Earthquake Browser (IEB) (<http://ds.iris.edu/>).

Анализ временных и высотных вариаций температуры атмосферы проводился с использованием данных спутниковых измерений (AIRS/Aqua и MERRA 3D) на 10 изобарических уровнях (p_k) от 500 до 70 гПа (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>), охватывающих высотный диапазон от верхней тропосферы до нижней стратосферы. Вертикальные профили температуры $T(p)$ были восстановлены над каждым участком размером $\pm 1^\circ$ от эпицентра землетрясения для временных периодов, составляющих не менее 2–3 мес. до и после каждого из рассматриваемых событий. Дискретизация исходных температурных данных $T(t)$ по времени составляла $\Delta t = 3$ ч.

Характеристики исследуемой выборки сейсмических событий ($M > 6.0$)

№	Дата	Время	Широта, °N	Долгота, °E	M	Регион
1	23.10.2011	10:41:22	38.72	43.51	7.1	Турция
2	20.05.2012	02:03:53	44.87	11.22	6.1	Италия
3	15.06.2013	16:11:02	34.40	25.02	6.3	Греция, Крит
4	16.06.2013	21:39:05	34.35	25.16	6.1	Греция, Крит
5	12.10.2013	13:11:52	35.49	23.26	6.8	Греция, Крит
6	24.05.2014	09:25:03	40.30	25.45	6.9	Эгейское море
7	17.11.2015	07:10:07	38.67	20.60	6.5	Греция
8	30.10.2016	06:40:19	42.85	13.09	6.6	Италия

Алгоритм обработки спутниковых данных

Установление связи между динамикой атмосферных и литосферных процессов строится на предположении, что обусловленные сейсмической активностью вариации параметров существенно отличаются от фоновых флуктуаций, которые имеют место в периоды без сильных землетрясений. Из этого, соответственно, следует необходимость выделения связанных с сейсмической активностью характерных областей аномального поведения во временных последовательностях данных с помощью соответствующих интегральных показателей [Свердлик, Имашев, 2017]. Основное внимание при этом уделялось периодам, предшествующим сильным землетрясениям.

Алгоритм вычисления интегральных показателей аномальных вариаций временных рядов температуры основан на использовании одного из ставших уже традиционным подходов, который заключается в разделении данных наблюдений на длинно- и короткопериодные компоненты с последующей фильтрацией и удалением гладких и трендовых составляющих. Обработка результатов спутниковых измерений температуры атмосферы включает следующие этапы.

1. *Подготовка спутниковых данных.* На первом этапе выполнялась предварительная обработка загруженных фрагментов спутниковых данных. Для каждого из сейсмических событий были сформированы непрерывные временные ряды с различным разрешением по времени ($\Delta t = 3, 12$ и 24 ч), содержащие значения температуры на всех высотных уровнях атмосферы от 500 до 70 гПа. Продолжительность рядов наблюдений $T(t)$ составляла 4–6 мес. Также по профилям температуры $T(p)$ определялась высота тропопаузы на основе критериев Всемирной метеорологической организации [Meteorology... , 1957].

2. *Спектральный анализ временных рядов температуры атмосферы.* Вследствие нестационарной и нелинейной природы факторов, влияющих на изменение температуры атмосферы, крупномасштабные (низкочастотные) компоненты временных рядов

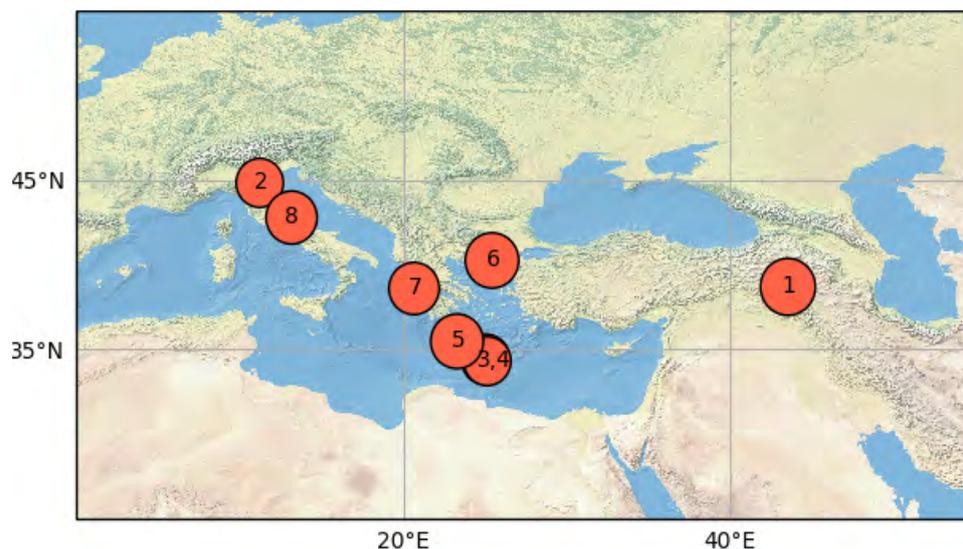


Рис. 1. Расположение эпицентров исследуемой выборки землетрясений. Номера соответствуют номерам событий в таблице.

выявлялись с использованием спектрального анализа на основе аппарата непрерывного вейвлет-преобразования. Вейвлетограммы позволили выделить скрытые периодичности (квазистационарные компоненты), которые необходимо устранить наряду с низкочастотным сезонным трендом.

3. *Выделение короткопериодных вариаций температуры.* Обработка временных рядов температуры основана на анализе квазипериодических компонент спектра колебаний, период которых составляет $\sim 5-8$ дней. Правомерность такого подхода доказывают вейвлет-спектрограммы, отчетливо демонстрирующие вариации подобного временного масштаба перед крупными землетрясениями (рис. 2). Для выделения короткопериодных вариаций применялся метод нелинейной пороговой фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования [Donoho, Johnstone, 1994; Gadre et al., 2014], который имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими способами (например, полиномами высокого порядка и скользящим средним), что играет важную роль в задачах обработки сигналов сложной формы.

4. *Вычисление аномалий температуры атмосферы.* Временные ряды короткопериодных вариаций температуры на каждом изобарическом уровне были приведены к безразмерному виду вместе с исключением фактора нелинейной зависимости температуры от высоты. Для этого определялась динамика нормированных аномалий температуры (ΘT), рассчитанных как отношение отклоне-

ния текущего значения температуры от среднемесячного уровня к среднеквадратичному отклонению [Свердлик, Имашев, 2017].

5. *Выбор высотных диапазонов.* Одним из базовых положений при анализе температурных данных является объективный выбор высотных диапазонов для проведения расчетов. Смысл этой процедуры состоит в определении наиболее информативных изобарических уровней, которые целесообразно использовать для конкретных местоположений с учетом особенностей динамики вертикальной структуры температуры. Для этого в каждом отдельном случае рассчитывались коэффициенты корреляции (R) между вариациями температуры на каждой паре уровней (рис. 3).

По степени связи вариации температуры неоднородны и существенно различаются в отдельных областях атмосферы: наиболее высокая положительная корреляция наблюдается в свободной тропосфере, с увеличением высоты она уменьшается практически до нуля на границе раздела тропосферы и стратосферы и меняет знак в области перехода к положительным градиентам ($\gamma > \Delta T/\Delta p$). Результаты удобно и наглядно представлять в виде квадратной корреляционной матрицы, размерность которой соответствует числу рассматриваемых уровней p_k . Основываясь на таком матричном представлении исходных температурных данных, можно обоснованно и объективно производить выбор разделенных тропопаузой областей, в которых происходят наиболее интенсивные и противофазные колебания (рис. 3).

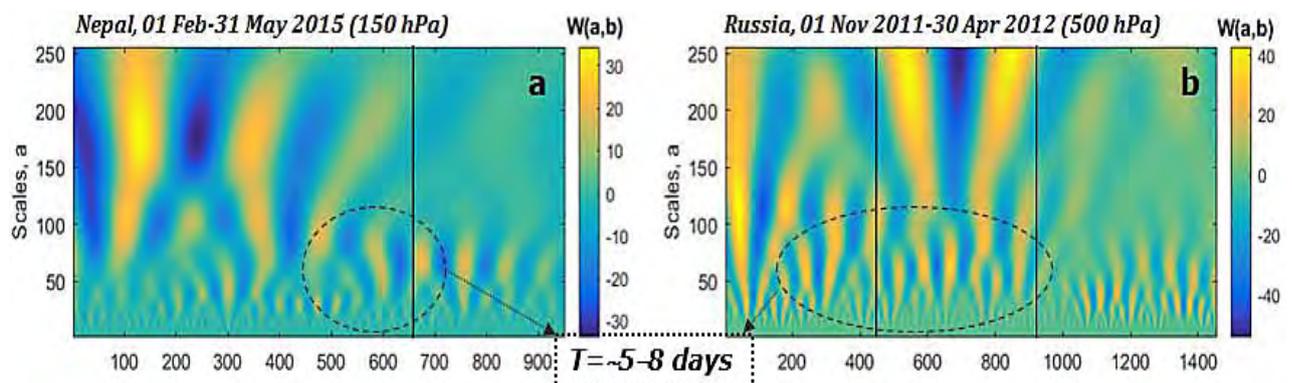


Рис. 2. Вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры ($\Delta t = 3$ ч) в периоды сейсмической активности в Непале (150 гПа) (а) и в России (500 гПа) (б). Вертикальными линиями показаны моменты сильных землетрясений.

6. Вычисление интегральных показателей аномальных вариаций временных рядов температуры. В качестве главных признаков, характеризующих поведение температуры атмосферы перед сильными землетрясениями, рассматривались аномальные изменения амплитуды и фазы вариаций температуры в разделенных тропопаузой и имеющих разные свойства слоях атмосферы (рис. 4). На этой особенности поведения был построен алгоритм диагностирования аномальных противофазных возмущений

температуры [Свердлик, Имашев, 2016]. Однако по факту в опубликованных ранее работах [Свердлик, Имашев, 2017; Свердлик, Имашев, 2018] расчеты произведения скользящих дисперсий временных рядов аномалий температуры (интегральный показатель D) выполнялись безотносительно к фазе колебаний температуры. Поэтому для повышения надежности, эффективности и достоверности выделения предсейсмических аномалий $T(t)$ нами была скорректирована процедура вычисления параметра D_{CORR}

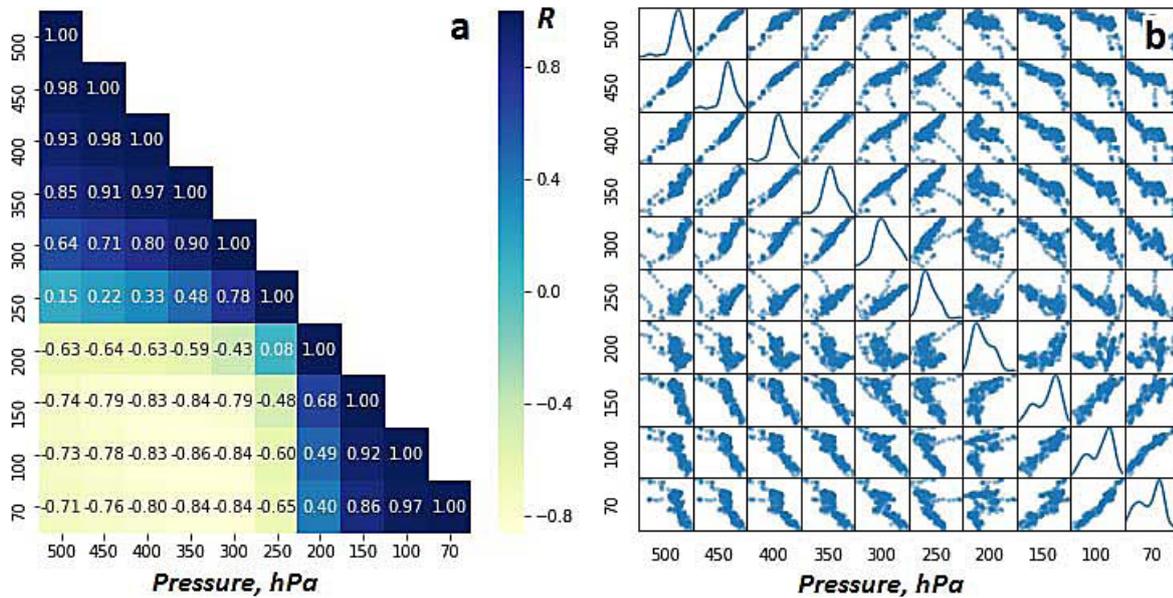


Рис. 3. Матричное представление коэффициентов корреляции между вариациями температуры на каждой паре изобарических уровней от 500 до 70 гПа над эпицентром землетрясения в Италии 20.05.2012 ($M = 6.1$).

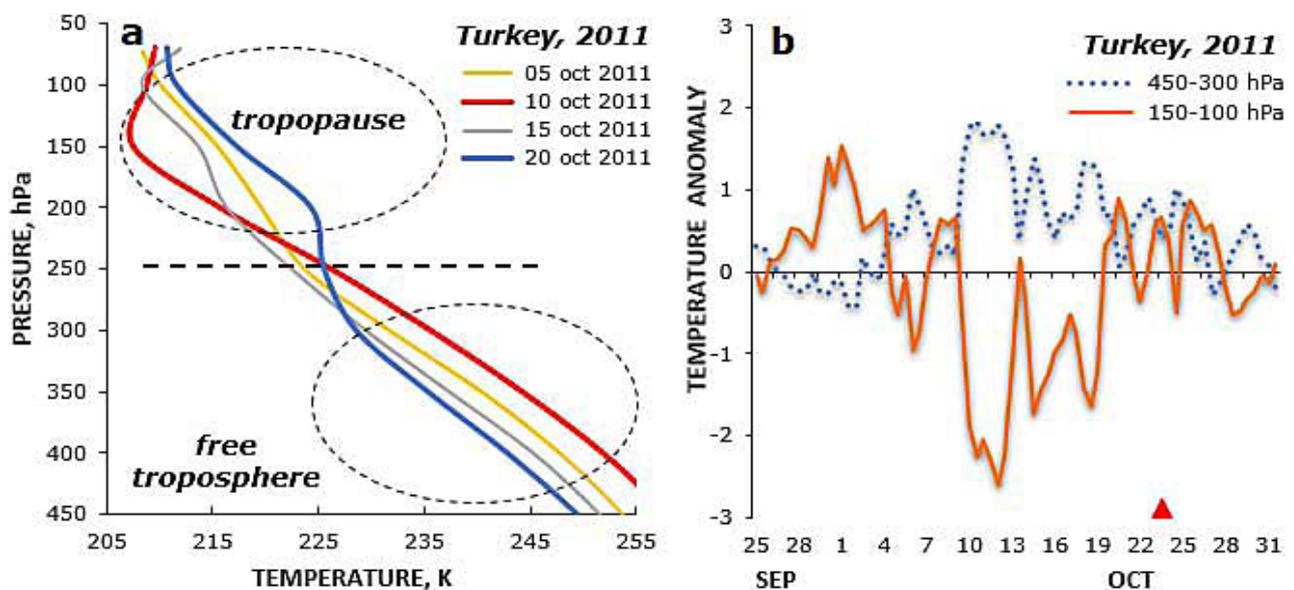


Рис. 4. Трансформация вертикальных профилей температуры (а) и временные ряды средних значений аномалий температуры в слоях 450–300 и 150–100 гПа (б) перед землетрясением в Турции (треугольником отмечен момент землетрясения с $M = 7.1$, 23.10.2011).

с учетом коэффициента корреляции (R) между изменениями температуры на рассматриваемых уровнях или в слоях атмосферы.

Расчет интегрального показателя D_{CORR} производился при следующих условиях: $D_{\text{CORR}} = 0$, если $R \geq 0$ и $D_{\text{CORR}} = D \times |R|$, если $R < 0$. То есть параметр D_{CORR} обнуляется при положительных значениях коэффициента корреляции и корректируется в зависимости от величины R при противофазных изменениях температуры (рис. 4b). Устраненное таким способом несоответствие позволило если не исключить, то в значительной степени ослабить проявление превышающих 2σ «ложных» (синфазных) аномалий.

7. Анализ аномальных значений временных рядов интегрального показателя D и сейсмических данных. Превышающие единицу значения произведения скользящих дисперсий (интегральный параметр D) временных рядов аномалий температуры в свободной тропосфере (ΘT_{FT}) и в области тропопаузы (ΘT_{TP}) свидетельствуют о наличии противофазных аномальных по амплитуде короткопериодных вариаций температуры в рассматриваемых слоях атмосферы, а следовательно, с высокой долей вероятности о возможной активизации сейсмичности.

Как показал опыт, при проведении расчетов более предпочтительным является усреднение ΘT_{FT} и ΘT_{TP} по двум и более изобарическим уровням, что обеспечивает дополнительное «естественное» сглаживание данных и выделение наиболее устойчивых в пространстве и во времени вариаций.

Результаты диагностирования короткопериодных аномалий температуры

Несмотря на амплитудные и фазовые различия вариаций температуры в области тропопаузы, определяемые сезонными условиями и географическими особенностями расположения эпицентров рассматриваемых землетрясений, применение описанного алгоритма позволило выявить закономерности (или признаки), общие для всех рассматриваемых периодов сейсмоактивности. Характерный для проведенных исследований

пример поэтапной обработки временных рядов температуры в период подготовки и прохождения землетрясения $M = 6.9$, произошедшего 24 мая 2014 г. в Эгейском море, показан на рис. 5.

Приведенные графики изменения температуры на разных уровнях сами по себе не дают однозначной картины согласованности с сейсмичностью (рис. 5a), или эта связь является неочевидной, хотя неслучайный характер эффекта часто достаточно хорошо просматривается. В то же время результаты обработки данных температурных измерений, полученные в соответствии с представленным алгоритмом для отдельных изобарических уровней атмосферы в марте–июне 2014 г., показали четко выраженные аномалии температуры за несколько дней до сильных землетрясений. Как видно, области наиболее высоких значений параметра D_{CORR} коррелировали с основными сейсмическими ударами. При этом моменты аномального перепада температуры были достаточно кратковременны, но, главное, были точно привязаны к сейсмическим ударам, предваряя их (рис. 5g). Эта особенность поведения температуры атмосферы проявлялась во всех выбранных для исследования случаях сильных землетрясений в Средиземноморском регионе, что иллюстрируют графики сведенных вместе и приведенных к одному моменту землетрясения вариаций параметра D_{CORR} (рис. 6). Показаны результаты расчетов для периода времени начиная с 14 дней до и заканчивая 4 днями после каждого события. Цветовая шкала соответствует величине $\log(D_{\text{CORR}} * 1000)$.

Как видно, явно выраженные аномальные изменения температуры в верхней тропосфере, основанные на данных спутникового зондирования с разрешением по времени $\Delta t = 12$ ч, наблюдались за 1–10 дней до сильных сейсмических событий, что согласуется с ранее полученными результатами диагностирования аномалий температуры в различных сейсмически активных регионах Азии [Свердлик, Имашев, 2015; Свердлик, Имашев, 2016; Свердлик, Имашев, 2017].

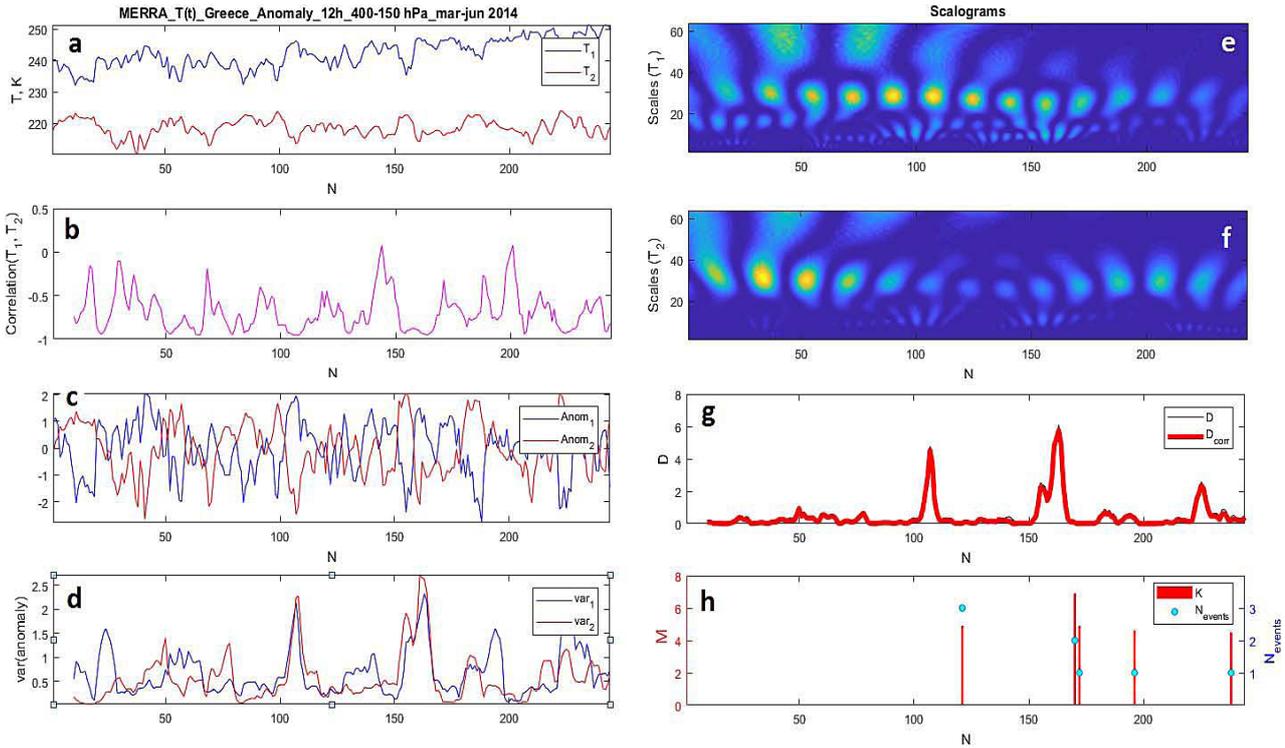


Рис. 5. Временные ряды температуры T_1 и T_2 на уровнях 400 и 150 гПа соответственно (а), коэффициент корреляции (б), аномалии температуры (с) и их скользящие дисперсии (д), спектры коэффициентов вейвлет-преобразования (е, ф), параметр D_{CORR} (г), магнитуда M и количество землетрясений за сутки N (h) в период с марта по июнь 2014 г. (сейсмическое событие 24.05.2014, $M = 6.9$, в Эгейском море).

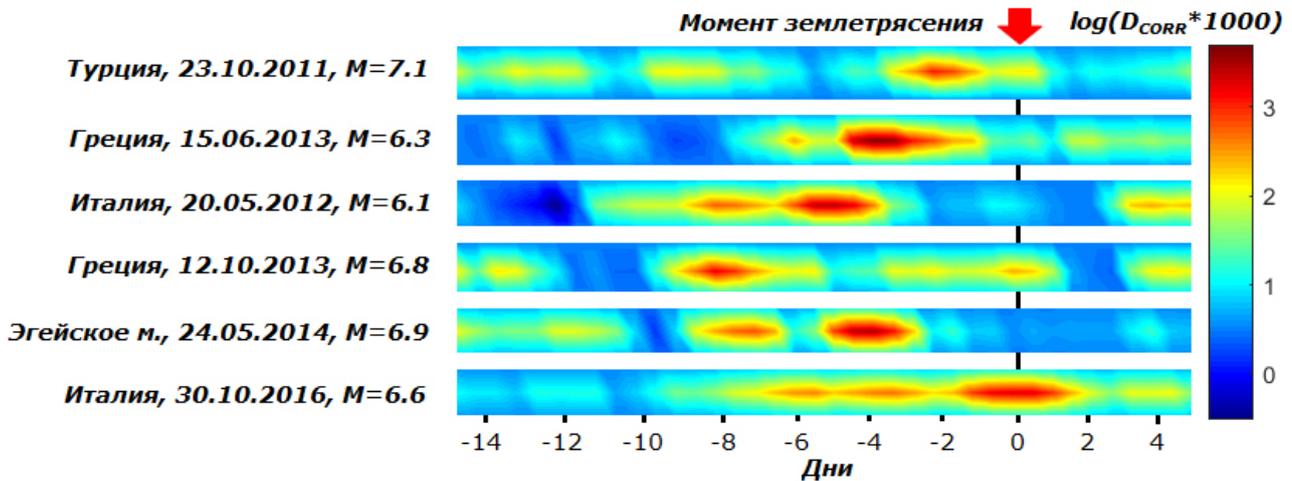


Рис. 6. Результаты диагностирования аномалий температуры атмосферы (D_{CORR}) перед землетрясениями магнитудой $M > 6.0$ в Средиземноморском регионе (2011–2016 гг.).

Заключение

Данные спутниковых измерений температуры в разделенных тропопаузой слоях атмосферы, характеризующихся различным поведением градиента температуры, показали, что динамика изменения амплитуды и фазы флуктуаций температуры имеет достаточно устойчивую связь с вариациями сейсмичности. Эта особенность поведения была

использована при разработке алгоритма диагностирования аномальных возмущений температуры, применение которого позволило выделить аномалии короткопериодных вариаций температуры, синхронизированные с периодами подготовки крупных сейсмических событий магнитудой $M > 6.0$, произошедших в Средиземноморском регионе Европы. Результаты совместной обработки

температурных и сейсмических данных для различных регионов мира согласуются между собой.

Разработанные программные модули применимы для решения более широкого круга задач, связанных с анализом временных рядов со сложной структурой.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC, обслуживающим систему Giovanni, за обеспечение свободного доступа к данным спутниковых измерений.

Список литературы

1. Имашев С.А., Свердлик Л.Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. // *Наука, новые технологии и инновации*. 2015. № 1. С. 15–19.
2. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26 (10). С. 908–916.
3. Кашкин В.Б., Романов А.А., Григорьев А.С., Баскова А.А. Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников Земли = [Kashkin V.B., Romanov A.A., Grigoriev A.S., Baskova A.A. Troposphere effects of Tuva earthquakes detected with space technology] // *Журнал Сибир. федерал. ун-та. Серия: Техника и технологии*. 2012. Т. 5(2). С. 220–228.
4. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане // *Наука и новые технологии*. 2015. № 1. С. 23–27.
5. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // *Вестн. Кыргыз.-Росс. славян. ун-та*. 2016. Т. 16(5). С. 170–174.
6. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности = [Sverdlik L.G., Imashev S.A. Atmospheric temperature anomalies during seismic activity] // *Журнал Сибир. федерал. ун-та. Серия: Техника и технологии*. 2017. Т. 10(6). С. 783–793.
7. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Вариации температуры верхней тропосферы над сейсмически активными регионами Азии // *Вестн. Кыргыз.-Росс. славян. ун-та*. 2018. Т. 18(4). С. 188–193.
8. Bhardwaj A., Singh S., Sam L., Bhardwaj A., Martín-Torres F.J., Singh A., Kumar R. MODIS-based estimates of strong snow surface temperature anomaly related to high altitude earthquakes of 2015 // *Remote Sens. Environ.* 2017. Vol. 188. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.005>
9. Donoho D.L., Johnstone J.M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // *Biometrika*. 1994. Vol. 81(3). P. 425–455. <https://doi.org/10.2307/2337118>
10. Gadre V.M., Dimri V.M., Chandrasekhar E. *Wavelets and fractals in earth system sciences* // Boca Raton, FL: Taylor & Francis Inc., 2014. 286 p.
11. Jiao Z-H., Zhao J., Shan X. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. Vol. 18(4). P. 1013–1036. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>
12. Meteorology - A three-dimensional science: Second session of the Commission for Aerology // *WMO Bulletin / World Meteorological Organization*. 1957. Vol. 6(4). P. 134–138. https://library.wmo.int/pmb_ged/bulletin_6-4_en.pdf
13. Saradjian M.R., Akhoondzadeh M. Thermal anomalies detection before strong earthquakes ($M > 6.0$) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 11(4). P. 1099–1108. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1099-2011>
14. Tramutoli V., Di Bello G., Pergola N., Piscitelli S. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas // *Ann. Geophys-Italy*. 2001. Vol. 44(2). P. 295–312.
15. Tronin A. Satellite remote sensing in seismology: A review // *Remote Sens.* 2010. Vol. 2(1). P. 124–150. <https://doi.org/10.3390/rs2010124>
16. Wu L., Shuo Zheng S., De Santis A., Qin K., Di Mauro R., Liu S., Rainone M.L. Geosphere coupling and hydrothermal anomalies before the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake in Italy // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2016. Vol. 16(8). P. 1859–1880. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1859-2016>

Сведения об авторах

СВЕРДЛИК Леонид Григорьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ИМАШЕВ Санжар Абылбекович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан.