

УДК 550.348.098.45
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-199-204

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Л.Г. Свердловик

Аннотация. Представлены результаты анализа вариаций температуры в нижней и средней атмосфере, которые наблюдались перед крупным Нуринским землетрясением с магнитудой $M = 6.7$, произошедшим 05 октября 2008 г. Профили температуры были получены по данным глобального реанализа MERRA-2. Использование специально разработанного алгоритма позволило выделить и идентифицировать предсейсмические аномальные изменения температуры на высотах вблизи тропопаузы. Аномалия наблюдалась за 2–3 дня до землетрясения. Низкая солнечная активность в период, предшествующий землетрясению, указывает на вероятное сейсмическое происхождение возмущений температуры. В качестве возможного механизма формирования сейсмоатмосферного эффекта рассматривались атмосферные гравитационные волны. Определены характеристики волновых возмущений температуры. По флуктуациям температуры рассчитаны высотные профили потенциальной энергии гравитационных волн.

Ключевые слова: землетрясение; температура; верхняя тропосфера; нижняя стратосфера; возмущения; атмосферные гравитационные волны; флуктуации; плотность потенциальной энергии.

ЖЕР ТИТИРӨӨНҮН АЛДЫНДА ТӨМӨНКҮ АТМОСФЕРАДАГЫ СЕЙСМИКАЛЫК ТОЛКУНДАРЫНЫН МҮНӨЗДҮҮ ӨЗГӨРҮШҮ

Л.Г. Свердловик

Аннотация. 2008-жылдын 5-октябрында болгон $M = 6,7$ баллдык Нура ири жер титирөөсүнө чейин байкалган атмосферанын төмөнкү жана ортоңку катмарларындагы температуранын өзгөрүшүнө талдоо жүргүзүүнүн натыйжалары келтирилген. Температура профилдери MERRA-2 глобалдык реанализ маалыматтарынан алынган. Атайын иштелип чыккан алгоритмди колдонуу тропопаузага жакын бийиктикте сейсмикалык аномалдуу температуранын өзгөрүшүн бөлүп көрсөтүүгө жана аныктоого мүмкүндүк берди. Аномалия жер титирөөдөн 2-3 күн мурун байкалган. Жер титирөөнүн алдында күндүн аз активдүүлүгү температуранын бузулушунун ыктымалдуу сейсмикалык келип чыгышын көрсөтүп турат. Атмосфералык тартылуу толкундары сейсмо-атмосфералык таасирдин пайда болушунун мүмкүн болуучу механизми катары каралган. Толкундардын температурасынын бузулушунун мүнөздөмөлөрү аныкталат. Гравитациялык толкундардын потенциалдык энергиясынын бийиктик профилдери температуранын өзгөрүшү боюнча эсептелет.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; температура; жогорку тропосфера; төмөнкү стратосфера; бузулуулар; атмосфералык тартылуу толкундары; термелүүлөр; потенциалдык энергиянын тыгыздыгы.

CHARACTERISTIC VARIATIONS OF PRE-SEISMIC WAVE DISTURBANCES IN LOWER ATMOSPHERE

L. G. Sverdlik

Abstract. The article provides the results of temperature variations analysis in the lower and middle atmosphere which were observed before the large Nurinsky earthquake with magnitude $M = 6.7$ that occurred on October 05, 2008. Temperature profiles had obtained from the global atmospheric reanalysis of MERRA-2. The usage of a specially developed algorithm made it possible to allocate and identify pre-seismic abnormal temperature changes at altitudes

near the tropopause. An anomaly was observed 2-3 days before the earthquake. Low solar activity in the period preceding the earthquake indicates the probable seismic origin of temperature disturbances. Atmospheric gravitational waves were considered as a possible mechanism for forming the seismoatmospheric effect. Characteristics of temperature's wave disturbances were determined. Based on temperature fluctuations, high-altitude profiles of potential energy of gravitational waves are calculated.

Keywords: earthquake; temperature; upper troposphere; lower stratosphere; perturbation; atmospheric gravity wave; fluctuation; potential energy density.

Введение. Важной составной частью экспериментальных исследований, направленных на установление связей между процессами в различных геосферах Земли, является изучение отклика нижней и средней атмосферы на процессы, происходящие в литосфере. Использование методов дистанционного зондирования Земли позволило зарегистрировать ряд аномальных физических явлений, совпадающих по времени и месту с крупными землетрясениями, что дает основание предполагать наличие связи между ними [1]. Одним из проявлений сейсмоатмосферных возмущений являются тепловые аномалии, наблюдаемые на различных уровнях атмосферы. Так, исследования, проводимые в сейсмически активных регионах, показали определенную тенденцию к увеличению амплитуды температурных флуктуаций перед землетрясениями [2, 3]. Выполненный в последние годы анализ данных спутниковых измерений температуры атмосферы [4–6] показал, что в разделенных тропопаузой слоях атмосферы, характеризующихся различным поведением градиента температуры, динамика флуктуаций температуры имела достаточно устойчивую связь с сейсмичностью. Вместе с тем, перед сильными землетрясениями было обнаружено аномальное поведение температуры в слоях средней атмосферы [7].

Особенностью наблюдаемых изменений температуры являлась волновая структура аномальных вариаций. Поэтому при изучении и идентификации предсейсмических волновых процессов очевидна необходимость определения параметров периодических компонентов, выделение преобладающих по амплитуде колебаний, а также их локализация в пространстве и во времени.

Сейсмические и спутниковые данные. Данные спутникового зондирования температуры атмосферы (MERRA-2) и каталоги сейсмических событий (*KNET*, *USGS*) послужили основой для установления взаимосвязи между процессами, протекающими в литосфере и атмосфере. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере и определение их параметров проведено на примере разрушительного Нуринского землетрясения с магнитудой $M = 6.7$ (39.52° с.ш.; 73.77° в.д.), которое произошло на юге Кыргызстана 05 октября 2008 г. (15:52:49 UT) на глубине примерно 27.5 км [8]. Сотрясения были зарегистрированы на обширной территории, включающей приграничные районы Кыргызстана, Таджикистана и Китая [9, 10].

Временные серии температуры $T(t)$ с 3-часовым разрешением по времени ($\Delta t = 3h$) были восстановлены по данным спутниковых измерений на 21 изобарических уровнях от 500 до 2 hPa (~от 5 до 48 км) над участком, размером $\pm 1^\circ$ от эпицентра землетрясения. Продолжительность временных рядов составляла 1 месяц до и после событий [11].

Дополнительно для проверки возможного влияния солнечной и геомагнитной активности на формирование атмосферных возмущений были проанализированы данные Всемирного центра по геомагнетизму Киотского университета в Японии [12]. Оценка уровня геомагнитной активности проводилась с использованием индекса D_{ST} (nT).

Методика обработки спутниковых данных. Выделение связанных с сейсмической активностью возмущений температуры проводилось с использованием различных подходов к обработке спутниковых данных. Первоначально, в соответствии алгоритмом, представленным в работах [9, 10], определялись профили отношения скользящих дисперсий ($R(h)$) в коротком (VAR_{STA}) и длинном (VAR_{LTA}) временных окнах. Этот параметр часто используется для выявления аномальных изменений амплитуды и/или частоты в исследуемых временных рядах. Далее на основе текущих значений температуры (T) и невозмущенных или средних величин (\bar{T}) на фиксированных уровнях атмосферы, вычислялись профили нормированных флуктуаций температуры:

$$T'(h) / \bar{T}(h) = (T(h) - \bar{T}(h)) / \bar{T}(h).$$

По данным о флуктуациях температуры рассчитывались высотные распределения плотности потенциальной энергии гравитационных волн на единицу массы воздуха (E_p) [13]:

$$E_p = \frac{g^2}{2N^2} (\overline{T' / T})^2,$$

где: T' / \bar{T} – амплитуды нормированных возмущений температуры; g – ускорение свободного падения. Частота Брента–Вяйсяля (N) определялась по измеренным профилям температуры атмосферы:

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial h} + \frac{g}{c_p} \right),$$

где: c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; $g/c_p = 9.8 \times 10^{-3}$ К/м – адиабатический градиент температуры; h – вертикальная координата.

Следует отметить, что поскольку в дневное время сейсмоатмосферные эффекты могли быть замаскированы нестабильностью атмосферы, вызванной солнечным нагреванием и конвективными движениями, рассматривались быстрые изменения температуры, происходящих в течение темного времени суток (21:00–06:00 LT).

Волновые возмущения температуры в области UTLS, предшествующие сейсмической активности. Результаты обработки температурных данных в верхней тропосфере / нижней стратосфере (UTLS) в период с 06 сентября по 16 октября 2008 г. показаны на рисунке 1, а. Особенности динамики скорости изменения температуры демонстрирует высотно-временной разрез отношения $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$ ($h = 5.0\text{--}25.0$ км), свидетельствующий, что в целом, вариации температуры характеризовались значительными временными изменениями на всех высотах UTLS. Но наиболее существенное и согласованное изменение термического состояния происходило перед сильным сейсмическим событием, что проявлялось в аномальном увеличении амплитуды короткопериодных колебаний температуры [10]. В данном случае возмущение наблюдалось с 1 по 3 октября 2008 г. за 2–3 дня до сейсмического события.

Чтобы исключить возможное влияние эффектов солнечно-геомагнитной активности, были построены временные ряды среднесуточных значений индекса D_{ST} (рисунок 1, б). Согласно полученным данным, солнечная активность в сентябре–октябре 2008 г. оставалась на низком уровне ($-30 \text{ nT} < D_{ST} < 10 \text{ nT}$), особенно в период, предшествующий землетрясению, что указывает на вероятное сейсмическое происхождение возмущений температуры в UTLS.

Изменения вертикальной структуры нормированных флуктуаций температуры в период с 25 сентября по 07 октября 2008 г. подтверждают факт наличия локального возмущения, предшествующего событию, и дают представление о процессе его формирования и интенсивности (рисунок 2, а).

В наблюдаемых изменениях T' / \bar{T} достаточно четко проявлялся волнообразный характер вариаций. В качестве вероятного механизма формирования наблюдаемого эффекта рассматривались атмосферные гравитационные волны [14–16]. Признаком активности гравитационных волн, распространяющихся почти вертикально, может являться чередование областей, в которых флуктуации температуры меняли знак (положительные и отрицательные) (рисунок 2, б). На высотах от 40 до 50 км, как и предполагалось, вариации также демонстрировали некоторое увеличение амплитуды, связанное, в том числе, с уменьшением плотности воздуха. Рассчитанные профили нормированных флуктуаций температуры позволили оценить доминирующие длины волн и области высот температурного возмущения. Для этого к каждому профилю выделенных колебаний было применено непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) [3]. В результате получено, что вертикальная длина волны предсейсмического возмущения температуры составляла $\lambda = 11.1$ км (рисунок 3).

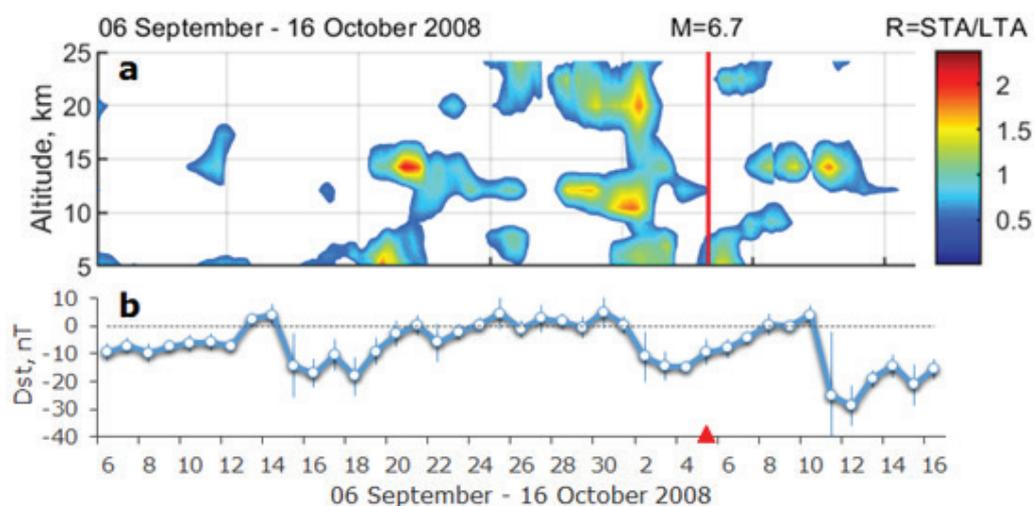


Рисунок 1 – Высотно-временное распределение отношения $R \geq 0.5$ над эпицентральной областью Нурина землетрясения (а) и соответствующие вариации индекса DST (б) в период с 06 сентября по 16 октября 2008 г.

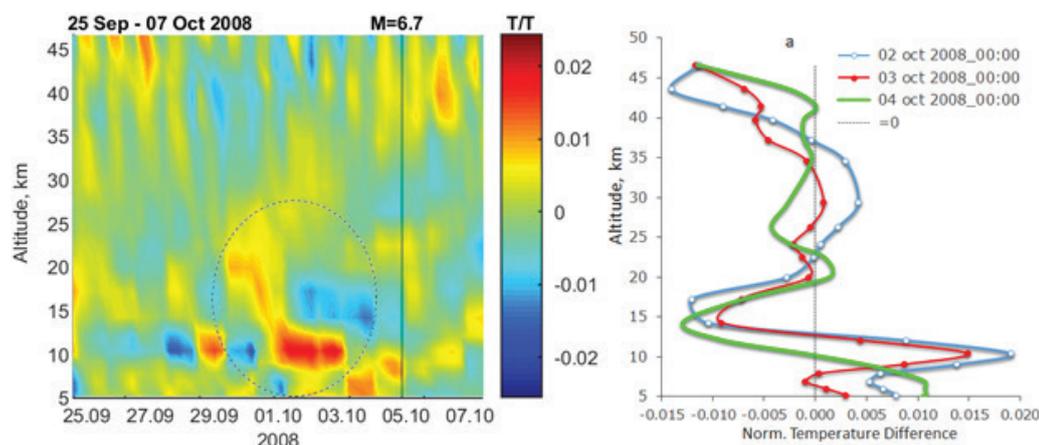


Рисунок 2 – Трансформация вертикальной структуры (а) и профилей (б) нормированных флуктуаций температуры (T' / \bar{T}) над эпицентральной областью Нурина землетрясения с 25 сентября по 07 октября 2008 г.

Временные ряды флуктуаций температуры использовались для расчета плотности потенциальной энергии гравитационных волн (E_p). На рисунке 4 показаны результаты расчетов E_p в период подготовки Нурина землетрясения.

Как видно, наиболее интенсивные волновые возмущения наблюдались за несколько дней до землетрясения, главным образом, в верхней тропосфере. Абсолютный максимум E_p находился на границе раздела тропосферы и стратосферы примерно на 2–3 км ниже тропопаузы, что может считаться достаточно типичным проявлением сейсмоатмосферного эффекта [7].

Выводы. Проанализированы вариации температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), измеренные спутниковым методом (MERRA-2) в период подготовки разрушительного Нурина землетрясения ($M = 6.7$, 05 октября 2008 г.). Использование специально разработанного алгоритма позволило выделить и идентифицировать предсейсмические аномальные изменения температуры на высотах вблизи тропопаузы. Аномалия наблюдалась за 2–3 дня до землетрясения. Низкая

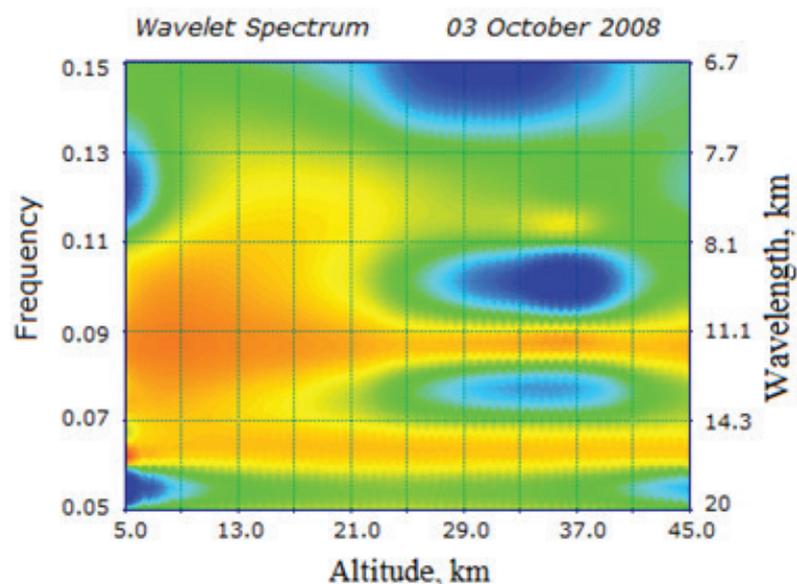


Рисунок 3 – Вейвлет-диаграмма нормированных флуктуаций температуры в диапазоне высот 5.0–45.0 км для измерения 03 октября 2008 г. (00:00 UTC)

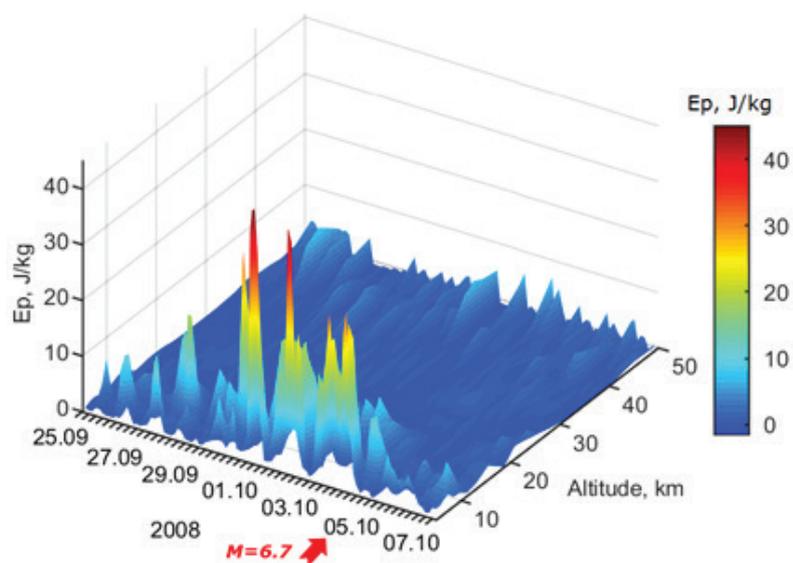


Рисунок 4 – Высотно-временное распределение плотности потенциальной энергии гравитационных волн (E_p) с 25 сентября по 07 октября 2008 г. Стрелкой показан момент землетрясения $M = 6.7$

солнечная активность в период, предшествующий землетрясению, указывает на вероятное сейсмическое происхождение возмущений температуры. Рассмотрены вопросы определения параметров предсейсмических волновых возмущений в *UTLS*. В качестве возможного механизма формирования сейсмоатмосферного эффекта рассматривались атмосферные гравитационные волны. Определены характеристики волновых возмущений температуры. В качестве основного показателя для оценки

активности гравитационных волн использовалась потенциальная энергия (E_p), которая напрямую зависит от вертикальных профилей температуры атмосферы.

Выявленные закономерности поведения температуры в зоне раздела тропосферы и стратосферы позволяют сделать вывод, что существует необходимость дальнейших исследований атмосферных эффектов землетрясений. На следующем этапе исследований предполагается перейти к более высоким слоям атмосферы, что позволит получить дополнительную информацию о взаимосвязи изменений параметров атмосферы и ионосферы с процессами подготовки крупных землетрясений.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC и Геологической службы США (USGS) за обеспечение свободного доступа к данным спутниковых и сейсмических измерений.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Частично работа проводилась в ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН.

Поступила: 04.03.22; рецензирована: 10.03.22; принята: 14.03.22.

Литература

1. Jiao Z.-H. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review / Z.-H. Jiao, J. Zhao, X. Shan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 18. No. 4. Pp. 1013–1036. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>.
2. Свердлик Л.Г. Результаты диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 9. С. 177–183.
3. Свердлик Л.Г. Гравитационные волны в стратосфере перед сильными землетрясениями в регионах Азии / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 12. С. 149–155.
4. Свердлик Л.Г. Вариации температуры верхней тропосферы над сейсмически активными регионами Азии / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 4. С. 188–193.
5. Sverdlik L. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan / L. Sverdlik, S. Imashev // MAUSAM. 2020. Vol. 71. № 3. P. 481–490.
6. Свердлик Л.Г. Аномальные вариации электрических характеристик земной коры и термического состояния атмосферы / Л.Г. Свердлик // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 8. С. 187–193.
7. Yang S.-S. Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes / S.-S. Yang, T. Asano, M. Hayakawa // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. Vol. 124. № 2. Pp. 1410–1425.
8. The USGS (United States Geological Survey). URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения: 20.02.2022).
9. Свердлик Л.Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA / Л.Г. Свердлик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
10. Sverdlik L. Anomalous temperature changes in the UTLS region prior to the 2008 Nura Earthquake / Л.Г. Свердлик // E3S Web of Conferences 333, 02013 (2021). RPERS 2021. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133302013>.
11. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 11.02.2022).
12. DC for Geomagnetism. URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения: 09.02.2022).
13. Schmidt T. Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data / T. Schmidt, A. De la Torre, J. Wickert // Geophys. Res. Lett. 2008. 35. L16807. DOI:10.1029/2008GL034986.
14. Kamali H. Relation between integral effect of sub-surface temperature variation (I) and seismic effects / H. Kamali, A. Bidokhti, H. Amiri // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. 9. P. 1815–1821.
15. Yu D. On the Relationship between Gravity Waves and Tropopause Height and Temperature over the Globe Revealed by COSMIC Radio Occultation Measurements / D. Yu, X. Xu, J. Luo, J. Li // Atmosphere. 2019. Vol. 10. Iss. 2. Article 75. DOI: 10.3390/atmos10020075.
16. Yang S.-S. Gravity Wave Activity in the Stratosphere before the 2011 Tohoku Earthquake as the Mechanism of Lithosphere-atmosphere-ionosphere Coupling / S.-S. Yang, M. Hayakawa // Entropy. 2020. 22(1). 110; DOI:10.3390/e22010110