_____ ГЕОФИЗИКА **____**

УЛК 550.343.62

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2020 г. Академик РАН В. В. Адушкин¹, В. И. Нифадьев², Б. Б. Чен², С. И. Попель^{3,*}, Г. А. Когай², А. Ю. Дубинский³, П. Г. Вайдлер⁴

Поступило 28.05.2020 г. После доработки 29.05.2020 г. Принято к публикации 01.06.2020 г.

По материалам экспериментальных исследований волновых возмущений в атмосфере Земли до и после каждого из 52 значимых землетрясений, произошедших за период с 1997 по 2018 гг. в азиатском регионе, показано, что величины амплитуд внутренних гравитационных волн, источниками которых являются сейсмически активные регионы, на уровне порога насыщения могут использоваться для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмически активные регионы, внутренние гравитационные волны, амплитуда температурных возмущений, краткосрочный прогноз землетрясений

DOI: 10.31857/S2686739720080034

Существующим методам прогнозирования (предсказания) особо опасных природных геофизических явлений свойственна малая эффективность вследствие малого времени прогноза, недостаточного для принятия соответствующих мер по предупреждению катастрофических последствий, особенно землетрясений. Краткосрочный прогноз землетрясений, основанный на физических предвестниках [1], связан с регистрацией различных аномалий геофизических величин. Вопрос о том, что же все-таки является предвестником, а что не является таковым, и какой из них лучше и надежнее, остается открытым и по сей день [2].

Внутренние гравитационные волны (ВГВ), генерация которых происходит в сейсмически активных регионах, главным образом, за счет выхода в атмосферу литосферных газов (см., например, [3, 4]), можно рассматривать как один из механизмов литосферно-атмосферных связей. При этом волны регистрируются до и после землетрясений (см., например, [5, 6]). По материа-

лам экспериментальных исследований волновых

Конвективная неустойчивость, возникающая в нижней и средней атмосфере при процессах, происходящих в литосфере, выступает в качестве основного источника генерации ВГВ в сейсмиче-

возмущений в атмосфере Земли до и после землетрясений в Узбекистане 26 мая 2013 г. и в Киргизии 8 января 2007 г. (а также данных по землетрясению в Казахстане 28 января 2013 г.) удалось [7] выявить ранее неизвестные изменения в параметрах внутренних гравитационных волн в течение нескольких суток до землетрясения, которые в некоторых случаях могут использоваться для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий. Для повышения качества интерпретации проводимых измерений необходимо увеличивать число экспериментальных исследований волновых возмущений в атмосфере Земли до и после землетрясений. В настоящей работе исследуются характеристики ВГВ, наблюдаемых до и после каждого из 52 землетрясений с магнитудами М ≥ 5.0 (по Рихтеру), произошедших за период с 1997 по 2018 гг., с целью установления возможности использования таких волн как предвестников землетрясений. В отличие от [7], где рассматривались лишь 3 землетрясения и, в основном, рассматривалась специфика поведения характерных длин волн ВГВ, здесь выявляется возможность использования величин амплитуд ВГВ, источниками которых являются сейсмически активные регионы, для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

¹ Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

² Кыргызско-Российский Славянский Университет, Бишкек, Кыргызстан

³ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Karlsruhe Institute of Technology, Campus North, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

^{*}E-mail: popel@iki.rssi.ru

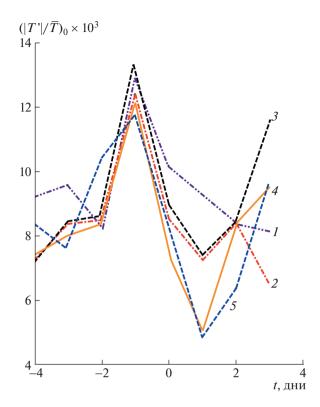


Рис. 1. Распределения максимальных значений нормированных амплитуд $(|T'|/\bar{T})_0$ до землетрясения и после землетрясения в Сычуани, Китай 12 мая 2008 г.

ски активных регионах (см., например, [8—11]). Диссипация энергии волны происходит при амплитуде ВГВ на уровне порога насыщения [12]. Амплитуды ВГВ, обнаруженных в стратосфере и идентифицированных как предвестники землетрясений, растут до высот стратопаузы, затем происходит диссипация волн [7]. Следовательно, величины реальных амплитуд ВГВ на уровне порога насыщения могут использоваться для оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

Величины реальных амплитуд ВГВ на уровне порога насыщения анализировались для 52 значимых землетрясений (с магнитудами $M \ge 5.0$), произошедших в 1997—2018 гг. в азиатском регионе. Для сведений о землетрясениях использовались данные [13]. Во всех случаях производилась обработка данных спутниковых измерений температуры средней атмосферы на 06:00 UTC, доступных в системе GIOVANNY [14], над пунктами, расположенными в произвольном порядке и на различных расстояниях от источника (эпицентра) землетрясения. Рассчитывались максимальные значения $(|T'|/\bar{T})_0$ нормированных амплитуд температурных возмущений $|T'|/\overline{T} = |T - \overline{T}|/\overline{T}$, где T – исходный профиль температуры, а \bar{T} – профиль сплайна, наложенного на профиль температуры, за 4 дня до землетрясения и 2-3 дня после него.

На рис. 1 представлены распределения максимальных значений нормированных амплитуд $(|T'|/\bar{T})_0$ за 4 дня до землетрясения и 3 дня после него для известного события в Сычуани, Китай (глубина гипоцентра H = 19 км, магнитуда M = 7.9по Рихтеру), произошедшего 12 мая 2008 г. в 06:28:01 UTC. Данные приведены для 5 точек измерения, расположенных по линии эпицентр землетрясения-Теплоключенка (Ю-В Иссык-Куль, Центральный Тян-Шань). Кривая 1 соответствует распределению $(|T'|/\bar{T})_0$ над точкой измерения Теплоключенка (78.5° в.д., 42.5° с.ш.), кривая 2 — над точкой измерения Шахъяр, Аксу, СУАР, Китай (83.46° в.д., 40.2° с.ш.), кривая 3- над точкой измерения Чарклык, СУАР, Китай $(88.42^{\circ} \text{ в.д.}, 37.9^{\circ} \text{ с.ш.}),$ кривая 4 - над точкой измерения Голмуд, Цинхай, Китай (93.38° в.д., 36.6° с.ш.), кривая 5- над точкой измерения Сершю, Гардзе, Сычуань, Китай (98.34° в.д., 33.3° с.ш.). Эпицентр находился в Дзёге, Нгава, Сычуань, Китай (103.322° в.д., 31.002° с.ш.).

На рис. 2 приведены распределения $(|T'|/\overline{T})_0$ до и после землетрясения в Афганистане (глубина гипоцентра H=193.7 км, магнитуда M=6.2 по Рихтеру), произошедшего 31 января 2018 г. в 07:07:00 UTC над пунктами с координатами 72.73° в.д., 40.25° с.ш. (кривая I), 74.65° в.д., 41.00° с.ш. (кривая I), 76.57° в.д., 41.75° с.ш. (кривая I).

Отметим, что для всех приведенных экспериментальных кривых на рис. 1, 2 наблюдается устойчивая закономерность хода величины $(|T'|/\bar{T})_0$, которая резко возрастает за сутки перед непосредственным землетрясением с последующим падением в момент землетрясения, независимо от местоположения точки измерения. На распределениях $(|T'|/\bar{T})_0$, характеризующих ситуацию до и после каждого из 9 землетрясений (рис. 3), которые произошли в период с 1997 по 2017 гг. в Таджикистане 17 ноября 2004 г. (кривая 1), Иране (северо-восток) 5 апреля 2017 г. (кривая *2*), Иране (восток), 10 мая 1997 г. (кривая 3), Иране (восток), 24 февраля 2009 г. (кривая 4), СУАР, Китай 11 мая 2017 г. (кривая 5), Кегени, Казахстан 28 января 2013 г. (кривая 6), Булунгуре, Узбекистан, 26 мая 2013 г. (кривая 7), Кадамжае, Киргизия 19 июля 2011 г. (кривая 8), Киргизии 12 мая 2008 г. (кривая 9), хорошо прослеживается такая же закономерность. Но данная закономерность наблюдалась не во всех случаях, а только тогда, когда гипоцентры землетрясений располагались, как правило, в нескольких десятках километрах от поверхности. Во всех других случаях (когда гипоцентры находились на значительных глубинах до нескольких сотен километров), существует

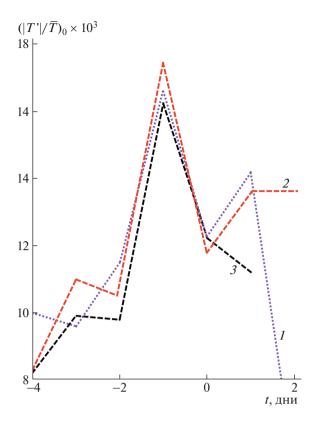


Рис. 2. Распределения максимальных значений нормированных амплитуд $(|T'|/\overline{T})_0$ до землетрясения и после землетрясения в Афганистане 31 января 2018 г.

тенденция к уменьшению вероятности выявленной закономерности.

Рассмотрим поведение нормированной амплитуды волны $(|T'|/\bar{T})_0$ с высотой до, во время и после землетрясений. Для этого используем результаты расчетов с применением вэйвлет-анализа, как наиболее предпочтительного метода выявления и анализа структуры волновых спектров. В качестве (типичного для рассматриваемых 52 землетрясений) примера сравним результаты анализа для двух рассмотренных выше землетрясений в Китае и Афганистане. Эти землетрясения отличаются тем, что их гипоцентры располагались на существенно различных глубинах. Кроме того, отличались их магнитуды. Гипоцентр землетрясения в Афганистане (горный массив Гиндукуш) располагался на глубине 193.7 км, а магнитуда составляла M = 6.2 (по Рихтеру). Землетрясение в Сычуани, Китай произошло на гораздо меньшей глубине (19.0 км) и имело магнитуду M = 7.9 (по Рихтеру). По-видимому, динамика выхода литосферных газов в период подготовки землетрясений, когда разгрузки природных газов создают в тропосфере сверхфоновые концентрации отдельных газов [15], перед землетрясениями различалась, что сказывалось на ходе нормированных амплитуд ВГВ. Так, за двое суток

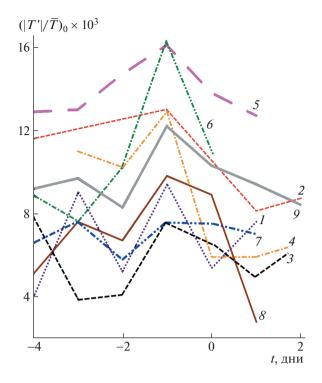


Рис. 3. Распределения максимальных значений нормированных амплитуд $(|T'|/\bar{T})_0$, характеризующих ситуацию до и после каждого из 9 землетрясений, которые произошли в азиатском регионе в период с 1997 по 2017 гг.

и одни сутки перед землетрясением в Сычуани на высотах, меньших 20 км над уровнем моря, отмечаются максимумы в ходе нормированной амплитуды волны. Перед землетрясением в Гиндукуше максимум в ходе нормированной амплитуды отмечен за двое суток перед землетрясением. В этом случае максимумы в ходе нормированной амплитуды наблюдаются на высотах между 40 и 50 км и, по-видимому, связаны с особенностями динамики выхода литосферных газов из гораздо больших глубин в Гиндукуше (по сравнению с ситуацией в Сычуани). Процесс разрушения ВГВ перед землетрясением в горном массиве Гиндукуш является более инерционным, чем в случае землетрясения в Сычуани, и, тем самым, насыщение волны наступает гораздо позже, что может быть объяснено различиями в геологическом строении этих сейсмически активных регионов и существенным различием в глубинах, где располагались гипоцентры землетрясений.

Таким образом, выявлена закономерность хода максимального значения нормированной амплитуды температурных возмущений в ВГВ, источниками которых являются сейсмически активные регионы. За сутки перед землетрясением эта величина резко возрастает с последующим падением в момент землетрясения, когда гипоцентры землетрясений располагаются, как правило,

на глубине, составляющей несколько десятков километрах под поверхностью. В случаях нахожления гипоцентров на более значительных глубинах (до нескольких сотен километров), вероятность выявленной закономерности в значительной степени снижается. Более информативной характеристикой ВГВ для оценки времени наступления землетрясений является распределение нормированной амплитуды волны с высотой. Насышение ВГВ, когда наблюдается максимальная амплитуда волны, наступает за одни сутки перед землетрясениями с гипоцентрами на глубинах в несколько десятков километрах от поверхности. При значительно более глубоких расположениях гипоцентров насышение ВГВ наступает за двое суток до землетрясения, и процесс разрушения волны (диссипации энергии) происходит позже, что может быть объяснено различиями в геологическом строении сейсмически активных регионов и существенным различием в глубинах, где располагались гипоцентры землетрясений. Следовательно, величины амплитуд ВГВ, источниками которых являются сейсмически активные регионы, на уровне порога насыщения могут использоваться для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Scholz, C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. 1973. № 4102. P. 803–810.
- 2. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A Systematic Compilation of Earthquake Precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476. № 3. P. 371–396.
- 3. *Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 2. С. 95—108.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). М.: ИФЗ РАН, 2018.

- Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // ДАН. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095—1098.
- 6. Popov K.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V., Biagi P.I., Liperovskaya E.V., Silina A.S. On Ionospheric Precursors of Earthquakes in Scales of 2-3 Hours // Phys. Chem. Earth. 2004. V. 29. P. 529–535.
- 7. Адушкин В.В., Нифадьев В.И., Чен Б.Б., Попель С.И., Когай Г.А., Дубинский А.Ю., Вайдлер П.Г. Об изменениях параметров внутренних гравитационных волн в атмосфере Центральной Азии перед землетрясениями // ДАН. 2019. Т. 487. № 3. С. 299—303.
- 8. *Fritts D.C.* Gravity Wave Saturation in the Middle Atmosphere: A Review of Theory and Observations // Rev. Geophys. Space Phys. 1984. V. 22. P. 275–308.
- 9. Fritts D.C., Rastogi P.K. Convective and Dynamical Instabilities due to Gravity Motions in the Lower and Middle Atmosphere: Theory and Observations // Radio Sci. 1985. V. 20. № 6. P. 1247–1277.
- Fritts D.C. A Review of Gravity Wave Saturation Processes, Effects, and Variability in the Middle Atmosphere // PAGEOPH. 1989. V. 130. P. 343–371.
- 11. Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere // Rev. Geophys. 2003. V. 41. № 1. P. 1003.
- 12. *Губенко В.Р., Кириллович И.А.* Диагностика насыщения внутренних атмосферных волн и определение их характеристик в стратосфере Земли с помощью радиозондовых измерений // Солнечно-земная физика. 2018. Т 4. № 2. С. 76—85.
- 13. https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes
- 14. https://giovanny.gsfc.nasa.gov/giovanny/#ser-vice=Vt&=MA13CPASMv5 2 0
- 15. Войтов Г.И., Добровольский И.П. Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20—31.

CHARACTERISTICS OF INTERNAL GRAVITY WAVES AND EARTHQUAKE WARNING

Academician of the RAS V. V. Adushkin^a, V. I. Nifadiev^b, B. B. Chen^b, S. I. Popel^{c,#}, G. A. Kogai^b, A. Yu. Dubinskii^c, and P. G. Weidler^d

^a Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
 ^b Kyrgyz, Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan
 ^c Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
 ^d Karlsruhe Institute of Technology, Campus North, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany
 [#]E-mail: popel@iki.rssi.ru

On the basis of experimental research materials of wave perturbations in Earth's atmosphere before and after each of 52 significant earthquakes that occurred during the period from 1997 to 2018 in the Asian region, it is shown that the magnitudes of the amplitudes of internal gravity waves, the sources of which are seismically active regions, can be used (at the saturation threshold level) for a short-term estimate of the time of upcoming seismic events.

Keywords: earthquakes, seismically active regions, internal gravity waves, amplitude of temperature perturbations, short-term earthquake forecast