ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 490, № 1, с. 33–36

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.388;550.510.535

КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ 8–11 ЧАСОВ, ВЫЗВАННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ТОХОКУ

© 2020 г. С. Л. Шалимов[1,*], А. А. Спивак[2], В. А. Харламов[2]

Представлено академиком РАН В. В. Адушкиным 19.08.2019 г.
Поступило 21.08.2019 г.
После доработки 10.09.2019 г.
Принято к публикации 01.10.2019 г.

На основе результатов инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН, анализируется отклик атмосферного давления на землетрясение Тохоку 11.02.2011 г. (магнитуда M ~ 9). Показано, что в результате землетрясения в атмосфере возникли длиннопериодные колебания давления с периодами, близкими к 8.5, 9.4, 10 и 10.4 ч. В качестве возможной причины возбуждения указанных барических вариаций рассматриваются волны в изотермической атмосфере с источником в эпицентре землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, атмосферное давление, длиннопериодные вариации

DOI: 10.31857/S2686739720010107

Землетрясения, особенно сильные, проявляются не только в виде сейсмических волн, резких изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и, как результат, их физико-механических свойств, но также возмущениями верхних геосфер – атмосферы и ионосферы [1, 2]. Особый интерес представляет рассмотрение отклика атмосферного давления на движения земной поверхности (например, вертикальные), вызванные землетрясениями [3, 4].

Цель настоящего сообщения – демонстрация возможного наличия длиннопериодных вариаций атмосферного давления с периодом вблизи 10 ч, вызванных сильными землетрясениями. В качестве примера рассмотрено катастрофическое событие Тохоку – одно из наиболее сильных землетрясений Японии, произошедшее 11.03.2011 г. [5]. По имеющимся данным, событие с магнитудой ~9 (по поверхностным волнам $M_S = 8.8$) произошло в 5 : 46 UT. Координаты основного толчка: 38.29° с.ш.; 142.69° в.д. Последствия землетрясения характеризовались помимо сейсмического, также и геофизическими эффектами (вариации магнитного поля и т.д.), значительными смещениями земной поверхности, а также возникновением цунами [6].

[1]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва, Россия*
[2]*Институт динамики геосфер Российской Академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: pmsk7@mail.ru*

В качестве исходных данных в настоящей работе привлекались результаты регистрации атмосферного давления P и его вариаций в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (MHV) [7] (результаты регистрации выложены на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом виде)[1]. Координаты MHV: 54.99° с.ш.; 37.76° в.д. (расстояние от MHV до очага рассматриваемого землетрясения составляет ~8000 км). Для анализа привлекались цифровые ряды данных, сформированных с дискретностью 1 мин. Оценка спектров вариаций P выполнялась на основе метода параметрической авторегрессии [8, 9].

Известно, что в результате сильных землетрясений возникают длиннопериодные колебания Земли как совпадающие с периодами ее собственных колебаний, так и с заметно бóльшими периодами, например ~120 мин и ~11 ч [10, 11]. Можно полагать, что квазигармонические движения земной поверхности с периодом, например, вблизи 11 ч могут быть обусловлены барическими возмущениями в атмосфере с близкими периодами.

На рис. 1 приведен график изменения атмосферного давления со временем t за период с 5 по 25 марта 2011 г. по данным MHV. Из данных рис. 1 следует, что землетрясение произошло в период относительной стабильности атмосферного давления в MHV (амплитуда вариаций не превышает 15 гПа). Основные вариации атмосферного давления характеризуются периодом ~70 ч. Это поз-

[1] www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/

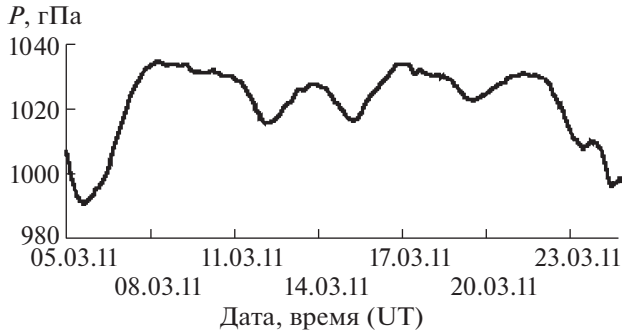

Рис. 1. Изменение атмосферного давления в MHV в период землетрясения Тохоку.

воляет анализировать периодичности вариаций P с периодами вблизи 10 ч.

На рис. 2 приведена СВАН-диаграмма вариаций атмосферного давления, полученная в результате обработки данных MHV за период с 11 по 16 марта 2011 г. Из рис. 2 видно, что приблизительно через 7–8 ч после землетрясения в MHV было зарегистрировано повышение вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 6–11 ч, которые наблюдались более трех суток. Оценки времени распространения сигнала от очага землетрясения до MHV t_0, выполненные с учетом расстояния до очага и предполагаемой скорости распространения длиннопериодных возмущений в атмосфере (~280–300 м/с [12]), дают величину $t_0 = 6.9–7.4$ ч, что свидетельствует о том, что наблюдаемые в MHV вариации P с большой вероятностью связаны с возмущениями, вызванными в атмосфере очагом землетрясения Тохоку.

Авторегрессионный спектр $P(t)$, вычисленный за период с 11 по 21 марта 2011г., приведен на рис. 3 в сравнении со спектром, вычисленным за шестидневный период, непосредственно предшествующий землетрясению. Из рис. 3 следует, что наряду с максимумом вблизи периода ~12 ч, связанным с группой близких по периодам полусуточных волн лунно-солнечного прилива, после землетрясения на спектре вариаций P отчетливо выделяются пики *1–5* с периодами соответственно 8.5, 9.4, 10, 10.4 и 11 ч. Это подтверждает, в частности, наше предположение о том, что обнаруженные ранее колебания Земли с периодом ~11 ч [11] проявляются также и в атмосферных процессах. Но при этом картина атмосферных возмущений, вызванных землетрясением в рассматриваемом диапазоне периодов, представляется гораздо более сложной по сравнению с твердой землей: возбуждаются колебания не одного 11-часового, а нескольких периодов.

Хотя исчерпывающая интерпретация зарегистрированного эффекта требует дальнейших исследований, можно высказать предположение о возможной причине возбуждения длиннопериодных атмосферных колебаний, основываясь на гипотезе Лэмба [13]. Эту гипотезу можно рассматривать как развитие принадлежащей Лапласу теории распространения волн в изотермической атмосфере. Лэмб предположил, что в атмосфере могут распространяться длинные плоские волны, аналогичные тем, что распространяются в океане

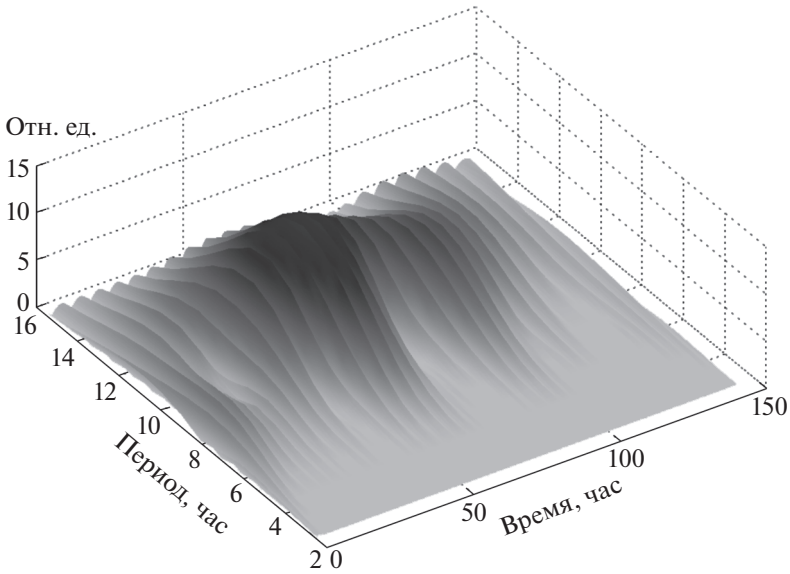

Рис. 2. Спектрально-временная диаграмма вариаций атмосферного давления в период землетрясения Тохоку (данные MHV).

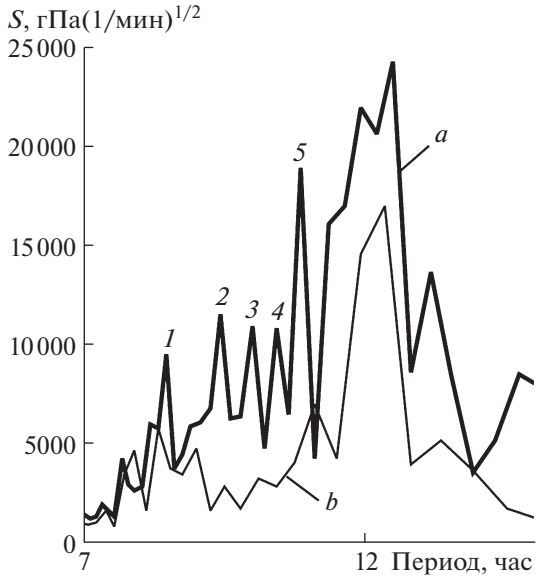

Рис. 3. Спектральная плотность вариаций атмосферного давления в период предшествующий (*b*) и после (*a*) землетрясения Тохоку по данным MHV; *1–5* – квазигармонические составляющие колебаний, возникшие в результате сейсмического события.

определенной глубины. Дисперсионное уравнение для таких волн имеет вид

$$\omega = \sqrt{gh}k,$$

где g – ускорение свободного падения, h – эквивалентная глубина равная $h = \gamma H$, γ – отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и объеме соответственно, H – характерная высота атмосферы, ω, k – частота и волновое число волны. Эти волны плоские или двумерные в том смысле, что вертикальная скорость у них отсутствует, и на всех высотах колебания находятся в одной фазе. В изотермической атмосфере $\gamma = 1$, так что при $H = 6.6$ км находим фазовую скорость волны равной 254 м/с. Если теперь принять для оценки найденную в работе [11] приблизительную длину волны колебаний $\lambda \approx 8000$ км, то период колебаний будет составлять ~9 ч, что вполне соответствует измеренному в настоящей работе диапазону.

Полученные данные свидетельствуют о том, что сильные землетрясения вызывают длиннопериодные вариации атмосферного давления на значительных расстояниях от очага. При этом наблюдается выраженная дискретность периодов вызванных барических пульсаций. Установление природы и возможных механизмов возбуждения вариаций атмосферного давления в периоды сильных сейсмических событий требует проведения дополнительных более детальных исследований. Тем не менее, авторы полагают, что полученные в настоящей работе данные могут расширить имеющиеся представления о воздействии землетрясений на атмосферу и окажутся полезными при разработке и верификации теоретических и расчетных моделей как самих землетрясений, так и сопровождающих их геофизических процессов.

Авторы также полагают, что при детальной обработке широкополосных сейсмических данных, на основе которых были выделены 11-часовые колебания Земли [1], будут выделены и другие колебания с периодами, которые найдены в настоящей работе, близкие к 8.5, 9.4, 10 и 10.4 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М.* О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 // Физика Земли. 2017. № 2. С. 1–12.
2. *Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Park P.H.* Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 186–196.
3. *Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М.* Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. № 12. С. 1290–1299.
4. *Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е.* Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // Доклады академии наук. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319.
5. *Тихонов И.Н., Ломтев В.Л.* Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: Тектонические и сейсмологические аспекты // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 2. С. 49–66.
6. *Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A.* Characteristics of the 2011 Great Tohoku tsunami on the Russian Far East coast deep-water and coastal observations // Pure and Applied geophysics. 2014. V. 171. P. 3329–3350.
7. *Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: От сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–120.
8. *Канасевич Э.Р.* Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: “Недра”, 1985. 400с.
9. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
10. *Соболев Г.А.* О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний Земли после землетрясений // Физика Земли. 2013. № 5. С. 12–27.
11. *Соболев Г.А.* Возникновение колебаний 11-часового периода после землетрясения Тохоку // ДАН. 2018. Т. 480. № 3. С. 348–352.
12. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
13. *Лэмб Г.* Гидродинамика. М.–Л.: Гостехиздат. 1947. 928 с.

ATMOSPHERIC PRESSURE VARIATIONS DUE TO TOHOKU EARTHQUAKES

S. L. Shalimov[a,#], A. A. Spivak[b], and V. A. Kharlamov[a]

[a] *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: pmsk7@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin August 19, 2019

Based on the results of instrumental observations made at the Geophysical Observatory "Mikhnevo" of IDG RAS, the response of atmospheric pressure to the Tohoku earthquake of 11.02.2011 г. (magnitude $M \sim 9$) is analyzed. It is shown that long-period pressure fluctuations with periods close to 8.5, 9.4, 10 and 10.4 h occurred as a result of an earthquake in the atmosphere. Waves in an isothermal atmosphere with a source in the epicenter of the earthquake are considered as a possible cause of excitation of these baric variations.

Keywords: earthquake, atmospheric pressure, long period variations