ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 507, № 2, с. 272–276

УДК 551.510.535; 537.877

ВОЗМУЩЕНИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ 15.01.2022, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ СДВ-РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

© 2022 г. М. С. Соловьева^{1,*}, С. Л. Шалимов^{1,**}

Представлено академиком В.В. Адушкиным 30.07.2022 г. Поступило 01.08.2022 г. После доработки 08.08.2022 г. Принято к публикации 22.08.2022 г.

Исследованы аномальные вариации сверхдлинноволнового сигнала (СДВ-сигнала), зарегистрированные после извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Показано, что интенсификация вариаций фазы и амплитуды СДВ-сигнала обусловлена пересечением радиотрасс распространяющимися после извержения вулкана атмосферной волной Лэмба и цунами.

Ключевые слова: волна Лэмба, цунами, акустико-гравитационные волны, сверхдлинные радиоволны, ионосферные возмущения

DOI: 10.31857/S2686739722601545

Исследования извержений крупных вулканов интересны как с точки зрения их влияния на среду обитания человека, так и как примеры сильных воздействий на внешние геосферы, позволяющие судить о механизмах этих воздействий.

В настоящей работе для изучения последствий воздействия на нижнюю ионосферу самого мощного за последнее время эксплозивного извержения вулкана Hunga Tonga – Hunga Ha'apai применен метод СДВ-радиопросвечивания. Хотя первое извержение этого вулкана было зарегистрировано еще 14.01.2022 г., но спутниковые данные показали, что самый сильный взрыв наблюдался 15.01.2022 в 4:00-4:10 UT, что привело к генерации воздушной волны Лэмба и (поскольку извержение имело место в акватории Тихого океана) цунами [1, 2]. Из источника цунами стало равномерно распространяться по всему Тихому океану (рис. 1), о чем свидетельствуют записи на глубоководных DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) станциях, которые нанесены на рис. 1.

На рис. 2 показаны записи возмущений поверхности океана на некоторых DART-станциях, представленных на рис. 1. Вертикальные черточки означают приход волны Лэмба (первая), которая создавала возмущения поверхности океана и цунами (вторая).

Для исследования отклика ионосферы на прохождение волны Лэмба и цунами использована региональная сеть станций СДВ-радиопросвечивания. Это удобный метод дистанционного исследования воздействий на ионосферу посредством регистрации амплитудно-фазовых характеристик сигналов ДВ и СДВ (в английской транскрипции VLF – very low frequency) радиостанций. Частоты этих сигналов (3-30 кГц) таковы, что они способны распространяться на тысячи километров от передатчика до приемника со слабым затуханием (~2 дБ на 1000 км) в естественном волноводе Земля-ионосфера (отражение от верхней стенки волновода – ионосферы, происходит на высотах около 60 км днем и около 85 км ночью). Амплитуда и фаза сигналов являются чувствительным индикатором состояния ионосферы, так что появляется возможность регистрировать распространение атмосферных волн в ионосферу по соответствующим возмущениям амплитуды и фазы СДВ-сигнала [4].

Для анализа состояния нижней ионосферы во время распространения волны Лэмба и цунами были использованы данные передатчиков электромагнитных сигналов NPM (21.4 кГц) и JJY (40 кГц), зарегистрированные на станции в Петропавловске-Камчатском (см. рис. 1). Станция оборудована UltraMSK-приемником [5], который измеряют одновременно амплитуду и фазу MSK (Minimum Shift Keying) модулированных сигналов в частотном диапазоне 10–50 кГц от не-

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российсклй академии наук, Москва, Россия

^{*}E-mail: rozhnoi@ifz.ru

^{**}E-mail: pmsk7@mail.ru



Рис. 1. Распространение цунами в Тихом океане. Концентрические линии показывают положение волны цунами через каждый час, начиная с момента его возникновения. Треугольниками показано положение глубоководных DARTстанций. Указан номер каждой станции (адаптированный рисунок из работы [1]). Черными квадратами показано положение 2 передатчиков – NPM (21.4 кГц) и JJY (40 кГц). Черный кружок – принимающая станция в Петропавловске-Камчатском (РТК). Линии – трассы распространения суб-ионосферных сигналов.

скольких передатчиков. MSK-сигналы имеют фиксированные частоты в интервале 50—100 Гц относительно основной частоты. Для анализа использовались данные с временным интервалом 20 с.

На рис. 3 показаны амплитуда и фаза сигнала по трассе NPM-PTK за 15.01.2022 совместно со среднемесячными значениями (пунктирная линия). Качество фазы сигнала в окрестностях терминатора неудовлетворительное из-за вызванного взаимодействием мод скачкообразного изменения фазы на 2–4 π в это время [6], однако для амплитуды и фазы ночного сигнала эта проблема отсутствует, и для него (после фильтрации в диапазоне частот 0.3-15 мГц) был сделан вейвлетанализ. Фильтр выбирался таким образом, чтобы исследовать периоды от 1 до 55 мин. В этом диапазоне возможно существование распространяющихся до ионосферы атмосферных акустических и внутренних гравитационных волн, разделяемых частотой Брента-Вяйсяля. Было найдено, что максимум спектральной плотности имеет период около 16-20 мин. Возмущения фазы содержат и более короткие периоды 4-5 мин.

Волна цунами пришла на DART 51407 на Гавайских островах (где установлен передатчик NPM) около 10 UT (см. рис. 1 и рис. 2) и прибли-



Рис. 2. Записи цунами на некоторых DART-станциях, представленных на рис. 1. Первая вертикальная черточка означает приход волны Лэмба, вторая – приход цунами. На горизонтальной шкале показано время распространения возмущений от момента их образования (адаптированный рисунок из работы [3]).



Рис. 3. На верхнем графике показаны амплитуда и фаза сигнала по трассе NPM—PTK за 15.01.2022 г. совместно со среднемесячными значениями (пунктирная линия). Средний график показывает фильтрованные в диапазоне 0.3—15 мГц сигналы за ночной период времени. Внизу показаны вейвлет-спектры фильтрованных сигналов.

зительно через час пересекла трассу. За два часа до этого пришла волна Лэмба. Эти моменты отчетливо зарегистрированы в возмущениях фазы СДВ-сигнала (см. рис. 3). Далее цунами распространялось под небольшим углом к трассе, приводя к возмущениям амплитуды и фазы сигнала. Приход цунами на DART 21419 был зарегистрирован в 14 UT. В этот момент наблюдается интенсификация возмущения NPM-сигнала как в амплитуде, так и в фазе (рис. 3), что может быть обусловлено подходом цунами к береговой линии. После этого цунами продолжает свое движение к тихоокеанскому побережью и примерно через час достигает Камчатки. Это подтверждают записи DART 46415 (см. рис. 1 и 2), который находится на той же линии времен распространения цунами. NPM-сигнал остается возмущенным еще час. Таким образом, все время пока NPM-сигнал пересекал Тихий океан, можно было наблюдать возмущения как в амплитуде, так и в фазе сигнала.

На рис. 4 показаны амплитуда и фаза сигнала по трассе JJY-PTK за 15 января 2022 г. в том же формате, что и на рис. 3. Трасса пролегает почти параллельно 10-часовой изолинии распространения цунами вдоль Японии и Курильских островов. Активизация возмущений в амплитуде и фазе сигнала наблюдается сначала в 10–11 UT, а потом через два часа с 12 UT до 17 UT с особенно сильными возмущениями в интервале 14–16 UT, что в целом соответствует приходу сначала волны Лэмба, а затем – цунами. С 14 UT до 15 UT волны приходят почти одномоментно вдоль JJY–РТК трассы (см. рис. 1). Хотя причина усиления колебаний в интервале 14–16 UT не установлена, но их достаточно высокая когерентность может свидетельствовать о возбуждении сейшевых колебаний в открытых заливах и бухтах приходящей волной цунами.

Таким образом, в настоящей работе посредством метода СДВ-радиопросвечивания продемонстрирована возможность возмущения нижней ионосферы распространяющимися после извержения вулкана волнами Лэмба и цунами. Если возмущение нижней ионосферы распространяющимися цунами было известно [4, 7], то ионосферный отклик на распространяющуюся волну Лэмба ранее не анализировался. Заметим, что в работе [8], на основе информации о глобальном



Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для ЈЈУ-сигнала.

распространении волны Лэмба в атмосфере и измерений посредством GPS утверждалось, что наблюдения ионосферных возмущений над континентальной частью свидетельствуют об излучении атмосферных внутренних волн волной Лэмба. Однако, строго говоря, подобное движущееся возмущение давления, распространяясь со скоростью звука, не излучает атмосферные волны. Вместе с тем, если учесть воздействие воздушной волны Лэмба на подстилающую поверхность (см. рис. 2), то скорость волны оказывается меньше скорости звука. При числе Maxa M < 1 возможно излучение атмосферных внутренних волн [9], которые будут опережать движущийся источник (как это имеет место в случае распространения цунами [4, 7, 10]). Только в этом случае результаты [8] находят свое естественное объяснение.

В свою очередь воздействие атмосферных внутренних волн на нижнюю ионосферу может быть обусловлено как диссипацией волны [4], так и поляризационными полями, возникающими при волновом движении плазмы в нижней части F-слоя [11]. Диссипация атмосферных внутренних волн сопровождается турбулизацией нейтральной компоненты ионосферы, а согласно теоретическому рассмотрению, интенсивность излучения акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью особенно велика в окрестности частот Брента–Вяйсяля [12]. Это обстоятельство указывает на причину появления возмущений вблизи частот Брента–Вяйсяля при прохождении волн Лэмба и цунами (см. рис. 3).

Наконец, оценим энергию волн Лэмба после их генерации. Кинетическая энергия в столбе высотой 1 см от участка земной поверхности равна:

$$E_{k} = 2\pi \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{1}{2} \rho u^{2} r dr = 2\pi c^{2} \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{1}{2} \rho u^{2} t dt,$$

где ρ – плотность воздуха, u – радиальная компонента скорости волны, распространяющейся со скоростью c и равная $p/c\rho$ [13]. Полагая $\rho = 10^{-3}$ г/см³, при длительности возмущения по-

рядка 1–2 ч [1], получим, что для амплитуды 250 Па [1] кинетическая энергия возмущения на масштабе порядка 20 км высоты стратосферного волновода (в котором, как считается, распространяется волна Лэмба) будет $3 \times 10^{22}-10^{23}$ эрг, т.е. 7–28 Мт ТНТ, что оказывается одного порядка с энергией извержения Кракатау в 1883 г. по существующей оценке [14].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00182). Используемые данные по СДВ радиопросвечиванию получены на УНУ (Уникальная научная установка "Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира" [https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Геофизические эффекты извержения Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 2. С. 156–162.
- Gusman A.R., Roger J. Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcano-induced sea level oscillations and tsunami simulations // GNS Science, https://doi.org/10.21420/DYKJ-RK41
- 3. *Kubota T., Saito T. Nishida K.* Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption // Science. https://doi.org/10.1126/science.abo4364
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., et al. Tsunamiinduced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals // J. Geophys. Res. 2012. V. 117.

Iss. A9, A09313.

https://doi.org/10.1029/2012JA017761

- 5. http://ultramsk.com
- 6. *Kaiser A.B.* VLF propagation over long paths // J. Atm. Terr. Phys. 1967. V. 29. N 1. P. 73–85.
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., et al. Detection of tsunami-driven phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals following the 2010 Chile earthquake // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 5012–5019. https://doi.org/10.1002/2014JA019766
- Zhang S-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J., Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves // Front. Astron. Space Sci. 2022. 9:871275. https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275
- 9. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044–1052.
- 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.
- 11. Шалимов С.Л., Соловьева М.С. Отклик ионосферы на прохождение тайфунов по наблюдениям методом СДВ-радиопросвечивания // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 3. С. 3–11.
- 12. Дробязко И.Н., Красильников В.Н. Генерация акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 11. С. 1357–1365.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
- Pekeris C.L. The propagation of a pulse in the atmosphere // Proc. R. Soc. Lond. A. 1939. V. 171. P. 434–449.

https://doi.org/10.1098/rspa.1939.0076

DISTURBANCES OF THE LOWER IONOSPHERE AFTER THE ERUPTION OF THE HUNGA-TONGA-HUNGA-HAAPAI VOLCANO ON 15.01.2022, RECORDED BY THE SUBIONOSPHERIC VLF RADIO SIGNALS

M. S. Solovieva^{*a*,#} and S. L. Shalimov^{*a*,##}

^aSchmidt United Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

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

##E-mail: riabovasa@mail.ru

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin July 30, 2022

The anomalous variations of the VLF (Very Low Frequency) signal recorded after the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano on 15.01.2022 have been investigated. It is shown that the intensification of the phase and amplitude variations of the VLF signal is caused by the crossing of radio paths by the atmospheric Lamb wave and tsunami propagating after the eruption of the volcano.

Keywords: Lamb wave, tsunami, acoustic-gravity waves, VLF radio waves, ionospheric disturbances