Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 11, с. 816 – 821 © 2022 г. 10 декабря

Мегаизвержение вулкана Хунга 15 января 2022 г.: регистрация ионосферных возмущений посредством СДВ и ГНСС радиопросвечивания

М. С. Соловьева[+], *А. М. Падохин*[*×1)], *С. Л. Шалимов*[+]

[+] *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, 123995 Москва, Россия*

[*] *Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия*

[×] *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, 108840 Троицк, Россия*

Поступила в редакцию 4 октября 2022 г.
После переработки 18 октября 2022 г.
Принята к публикации 18 октября 2022 г.

По данным станций сверхдлинноволнового (СДВ) радиопросвечивания в Дальневосточном регионе России и японско-австралийской сети приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) впервые исследован синхронный отклик нижней и верхней ионосферы при распространении атмосферной волны Лэмба и цунами, порожденных мегаизвержением подводного вулкана Хунга 15 января 2022 г. Обнаружено, что волновые вариации СДВ и ГНСС сигналов возникают не только при пересечении радиотрасс волнами Лэмба и цунами, но и по причине нелокальности сильных возмущений, обусловленной наличием геомагнитного поля. Сами волновые вариации вызваны воздействием на ионосферу атмосферных внутренних волн, генерируемых этими источниками, и пылевой компоненты извержения. Оценена энергия основного извержения и дана физическая интерпретация зарегистрированных ионосферных возмущений.

DOI: 10.31857/S1234567822230124, EDN: meruqo

15 января 2022 года произошло извержение подводного вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай. Хотя первое значительное извержение этого вулкана было зарегистрировано 14.01.2022, но спутниковые данные показали, что самый сильный взрыв наблюдался 15.01.2022 в 4:14:45 UT, что привело к генерации гигантской атмосферной волны Лэмба и (поскольку извержение имело место в акватории Тихого океана) разрушительного цунами [1, 2]. Предварительные оценки энергии, выделившейся при главном извержении [1], позволяют отнести его к классу очень редких событий планетарного масштаба, поскольку последнее сходное по энергии извержение произошло в 1883 г., когда взорвался вулкан Кракатау. Исследования подобных высокоэнергичных наземных источников интересны из-за их влияния на среду обитания человека и как примеры сильных воздействий на внешние геосферы, позволяющие судить о механизмах этих воздействий (см., например, [3]). В настоящей работе впервые для изучения последствий воздействия самого мощного за последнее время эксплозивного извержения вулкана применены метод СДВ-радиопросвечивания, позволяющий регистрировать возмущения нижней ионосферы и одновременные измерения параметров сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), используемые для регистрации возмущений верхней ионосферы.

Из уже опубликованных работ, посвященных анализу волновых возмущений, обусловленных рассматриваемым событием, следует, что возмущения в океане, нижней и верхней атмосфере регистрируются не только вблизи эпицентра [1, 2]. На данный момент хорошо установлена глобальность распространения от вулкана атмосферной волны Лэмба ($f \leq \leq 0.01$ Гц), обогнувшей Землю несколько раз [4, 5], а также цунами, радиально распространившееся по всему Тихому океану, о чем свидетельствуют записи на глубоководных DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) станциях [6], показанных на рис. 1. При этом оцениваемая скорость волны Лэмба (315–320 м/с) больше скорости цунами (около 200–220 м/с), так что на расстояниях в несколько тысяч километров от источника, где нами регистрировались возмущения ионосферы, волна Лэмба заметно опережает цунами (в Японии и вблизи Курильских островов приблизительно на 2 ч). Здесь важно отме-

[1)]e-mail: padokhin@physics.msu.ru

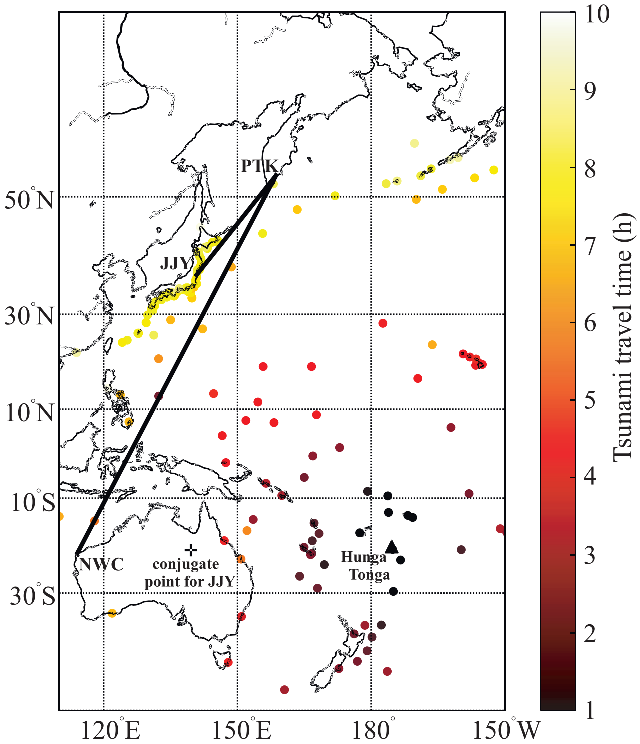

Рис. 1. (Цветной онлайн) Картина распространения цунами по Тихому океану. Круги – положение станций DART, цвет соответствует времени распространения волны. Черные линии – радиотрассы JJY (40 кГц) – Петропавловск-Камчатский (PTK) и NWC (19.8 кГц) – PTK. Треугольник – вулкан Хунга; крест – магнитосопряженная точка для станции JJY

тить, что волна Лэмба и цунами при определенных условиях становятся источником атмосферных внутренних волн [7, 8], которые способны распространяться до ионосферы.

Для анализа состояния нижней ионосферы во время распространения волны Лэмба и цунами были использованы данные приема СДВ сигналов передатчиков NWC (19.8 кГц) и JJY (40 кГц), зарегистрированные на станции в Петропавловске-Камчатском – PTK (см. рис. 1). Станция оборудована UltraMSK приемником, который измеряют одновременно амплитуду и фазу MSK (Minimum Shift Keying) модулированных сигналов в частотном диапазоне 10–50 кГц от нескольких передатчиков [9]. Для анализа использовались усредненные данные за каждые 20 с. В связи с тем, что в дневное время ионосфера очень стабильная и мало чувствительна к воздействиям более слабым, чем солнечные вспышки, анализ был проведен для ночного интервала времени, определяемого для каждой трассы ее протяженностью и геометрией. Ночной интервал при этом определялся по положению утреннего и вечернего терминатора на высоте 100 км. При этом для сигнала JJY ночной период – с 07 до 18 UT. Для сигнала NWC (длинна трассы более 10000 км) ночной период – с 12 до 18 UT.

На рисунке 2 показаны амплитуда и фаза сигнала для трассы JJY-PTK за 15.01.2022. Трасса пролегает почти параллельно 10-часовой изолинии распространения цунами вдоль Японии и Курильских островов. Слабая активизация возмущений в амплитуде и фазе сигнала в диапазоне 8–55 мин, характерных для атмосферных внутренних волн, наблюдается сначала во временном интервале от 7–9 UT, затем в 10–11 UT, а потом через два часа с 12 до 17 UT (с особенно сильными возмущениями в интервале 14–16 UT). Если возмущения во втором и третьем интервалах связываются (по скоростям) с приходом волны Лэмба и цунами соответственно, то для появления возмущений в первом интервале нужно было бы предположить слишком большие для волны Лэмба скорости. Следовательно, для возмущений в первом интервале имеет место другой механизм их возникновения, который рассмотрен ниже в связи с регистрацией возмущений в верхней ионосфере. Важно отметить, что периоды всех возмущений соответствуют периодам атмосферных внутренних волн.

Рассмотрим теперь результаты наблюдений на трассе NWC-PTK (рис. 3). В отличие от эффектов, обнаруженных на трассе JJY-PTK, здесь аномалия в фазе и амплитуде сигнала совершенно иная, точнее, инвертированная. В частности, фаза сигнала, начиная с 13–14 UT, демонстрирует отрицательное отклонение, что может свидетельствовать о подъеме верхней стенки волновода земля-ионосфера на пути, по которому проходит сигнал, а не об опускании ее. Заметим, что за две недели до 15.01.2022 и после этого подобного поведения сигнала в ночной ионосфере не наблюдалось. Поэтому можно полагать, что инвертированные аномалии сигнала обусловлены извержением вулкана Хунга.

Напомним, что согласно спутниковым наблюдениям, основной вулканический материал эксплозии достиг мезосферы, на что потребовалось около 30 мин [10]. Дальнейшее движение облака вулканической пыли в горизонтальном направлении определяли крупномасштабные процессы переноса в мезосфере как в меридиональном, так и в зональном направлении. Такие процессы описываются в рамках представлений о турбулентном состоянии ветров в верхней мезосфере–нижней термосфере (см., например, [11–13]). Процесс турбулентного переноса основывается на классических оценках расхождения жидких

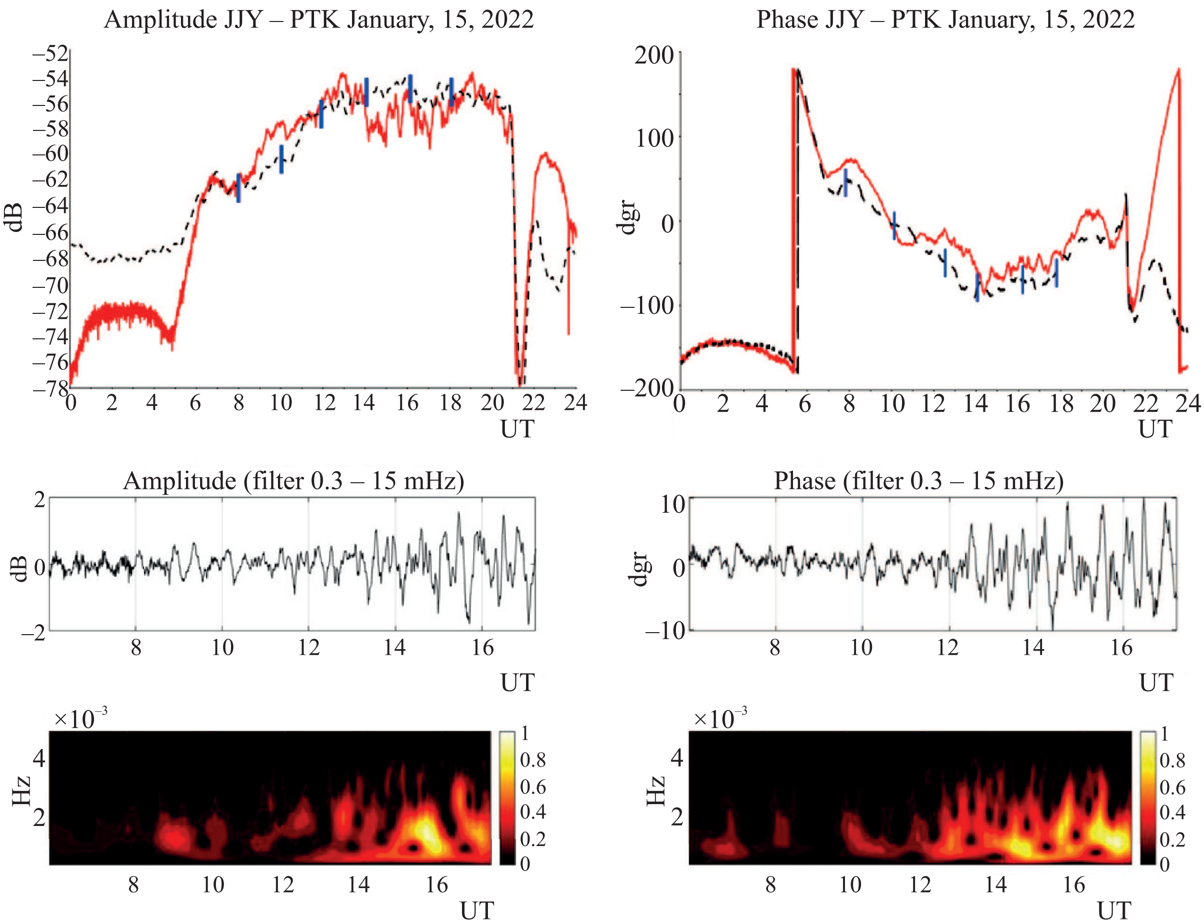

Рис. 2. (Цветной онлайн) Верхние графики – амплитуда и фаза по трассе JJY-PTK (сплошная линия), среднемесячный сигнал (пунктирная линия) и его СКО (вертикальные линии); средние графики – ночной фильтрованный сигнал; нижние графики – вейвлет-спектры фильтрованного сигнала

элементов на расстояние, большее первоначального, но меньшее основного масштаба турбулентности [14]. В частности, в инерционном интервале относительное расхождение изменяется как:

$$\langle r^2(t)\rangle = c\varepsilon t^3, \tag{1}$$

где c – константа порядка единицы, ε – скорость диссипации энергии, равная вводу энергии в инерционный интервал со стороны основного масштаба. Оценить ε можно следующим образом [14]: $\varepsilon = (\Delta u)^2(\Delta u/l)$, где $\Delta u, l$ – крупномасштабная вихревая скорость и основной масштаб соответственно. Полагая $\Delta u = 50$ м/с (что в три раза меньше фонового ветра в мезосфере–нижней термосфере, достигающего 150 м/с [15]), а для $\Delta u/l$, используя измеренную в инерционном интервале величину $1.6\cdot10^{-4}$ с$^{-1}$ [12], из последнего соотношения для $r \approx 4\cdot10^3$ км (приблизительное расстояние между областью извержения и трассой NWC-PTK) получим, что через $t \sim 9.5$ ч пылевое облако достигнет трассы NWC-PTK. Это приблизительно соответствует 13–14 UT и времени пересечения рассматриваемой трассы цунами, что и проявляется в спектрах возмущений, которые соответствуют атмосферным внутренним волнам.

Известно, однако, что цунами сопровождается положительной фазовой аномалией сигнала, которую можно связать с опусканием верхней стенки волновода [9]. В рассматриваемом случае наблюдается обратный эффект – подъем верхней стенки волновода (знак вариаций фазы указывает направление движения [16]). Следовательно, имеет место процесс, который преобладает над эффектом от цунами, и этот процесс может быть обусловлен присутствием в мезосфере пылевого вулканического облака. Действительно, в плазме ночной нижней ионосферы частицы пыли за счет микроскопических токов приобретают отрицательный заряд из-за большей подвижности электронов по сравнению с ионами. В зависи-

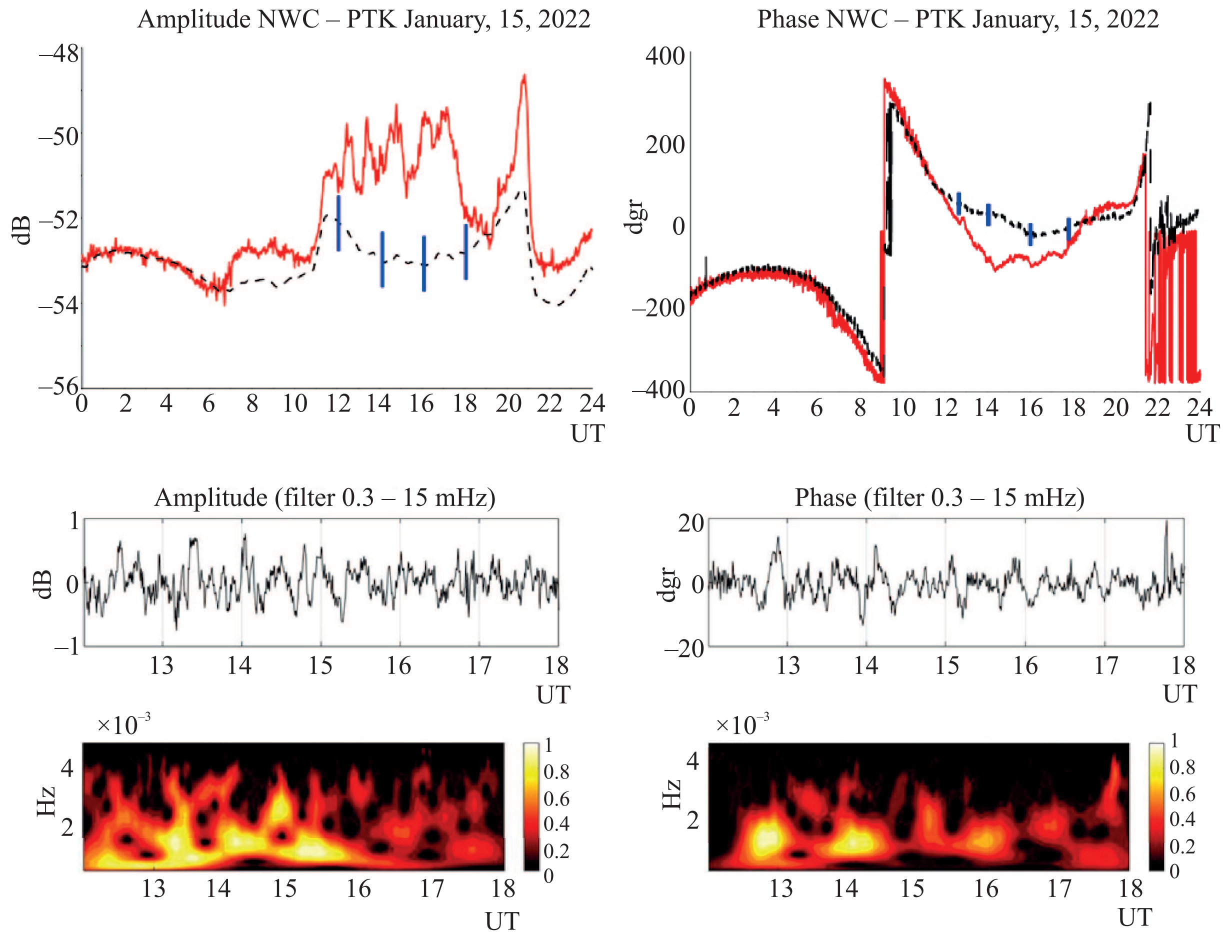

Рис. 3. (Цветной онлайн) То же, что на рис. 2, но по трассе NWC-PTK

мости от размера и плотности пылевых частиц заряд их в мезосфере может быть от нескольких единиц до нескольких десятков зарядов электронов [17, 18]. В результате зарядки пылевых частиц плотность электронов в запыленной плазме мезосферы существенно уменьшается, что соответствует наблюдаемому подъему верхней стенки волновода.

Одновременно с измерениями в нижней ионосфере регистрировались возмущения плазмы в верхней ионосфере. Радиопросвечиание сигналами ГНСС позволяет оценивать интегральную характеристику ионосферы – полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC) вдоль луча спутник–приемник, основной вклад в которое вносит ионосферный слой F. Наблюдаемые вариации TEC таким образом можно связать с возмущениями верхней ионосферы, вызванными рассматриваемым событием (см. например, [8]). В настоящей работе использовались данные японской сети GEONET, а также ряда дальневосточных приемников сети IGS. Для анализа эффектов в магнитносопряженной области использовались данные австралийской сети Geoscience Australia. Полученные оценки вариаций TEC в диапазоне 8–55 мин в координатах дальность от точки извержения – время для региона Японии и Курильских островов представлены на рис. 4a. Аналогичные оценки для магнитосопряженного региона Австралии приведены на рис. 4b. В первом случае отчетливо видны волновые структуры в интервалах времени 7–9 UT, 10–11:30 UT и после 12 UT. Такая картина возмущений в F слое вполне соответствует описанным выше возмущениям в нижней ионосфере, полученным по данным дальневосточной региональной сети СДВ станций.

Обратим здесь внимание на происхождение возмущений в первом временном интервале (7–9 UT). Прежде всего отметим, что Япония оказывается геомагнитно сопряженной с восточной частью Австралии (см. рис. 1). После извержения волна Лэмба радиально расходится от источника. Из-за воздействия атмосферной волны Лэмба на подстилающую поверхность ее скорость оказывается меньше, чем пред-

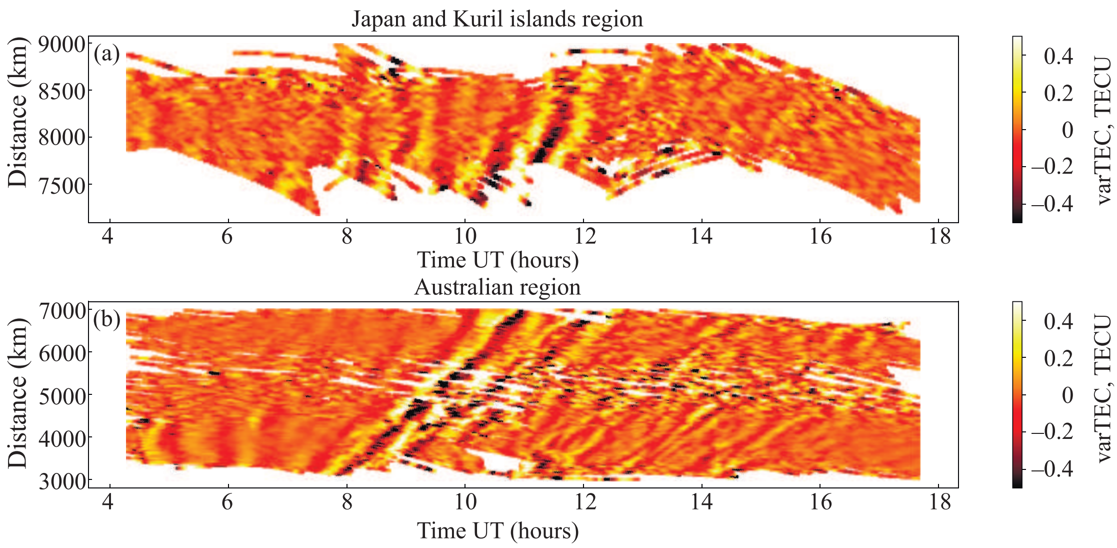

Рис. 4. (Цветной онлайн) Диаграмма дальность – время вариаций TEC над Японией и Курильскими островами (a) и Австралией (b)

сказываемая теорией скорость звука. При числе Маха $M < 1$ возможно излучение волной Лэмба атмосферных внутренних волн [7], которые способны опережать движущийся источник (по аналогии с цунами [8, 9]), распространяясь до ионосферных высот. Для расстояния от вулкана до восточной части Австралии около $4 \cdot 10^3$ км и скорости волны 315–320 м/с, волна Лэмба приблизительно через 3.5–4 ч достигнет восточной части Австралии. Ионосферные возмущения, вызванные ее приходом отчетливо видны на рис. 4b. Поскольку распространение этой волны на запад от источника сопровождается генерацией атмосферной внутренней волны, то последняя будет распространяться в ионосфере почти поперек силовых линий геомагнитного поля. Так как атмосферные внутренние волны на ионосферных высотах – это вертикально-поперечные волны, в которых групповая скорость перпендикулярна фазовой, и энергия волн распространяется под прямым углом к направлению распространения волнового фронта, то возмущения ветра $\delta\mathbf{U}$ будут направлены поперек геомагнитного поля $\mathbf{B_0}$, в результате чего в волне, распространившейся до нижней части F слоя, возникнут токи $\delta\mathbf{j} = \sigma_\mathbf{p}(\delta\mathbf{U} \times \mathbf{B_0})$. Если токи не бездивергентные, то возникнут поляризационные электрические поля $\delta\mathbf{E}$, которые приведут плазму в движение в направлении $\delta\mathbf{E} \times \mathbf{B_0}$. Схема этих процессов для распространяющейся ВГВ показана на рис. 5, где движения происходят вдоль фронта волны, а магнитное поле направлено из плоскости рисунка. Поляризационные электрические поля волны вдоль силовых линий геомагнитного поля переносятся (посредством

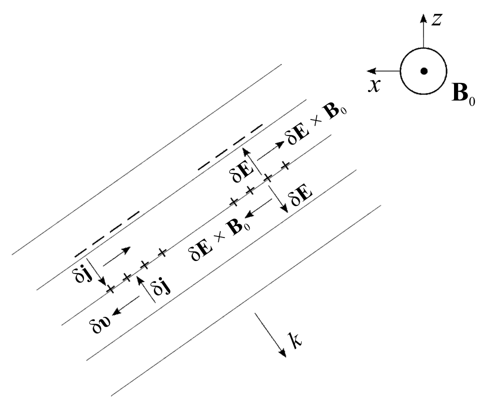

Рис. 5. Схема, показывающая как возмущения ветра в волне генерируют электрическое поле

альвеновских волн) в сопряженную ионосферу над Японией, где производят наблюдаемые нами волновые структуры в нижней и верхней ионосфере (см. рис. 2, 3 и 4a).

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

$$E_k = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2}\rho u^2 r\mathrm{d}r = 2\pi c^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2}\rho u^2 t\mathrm{d}t, \qquad (2)$$

где ρ – плотность воздуха, u – радиальная компонента скорости волны, распространяющейся со скоростью c и равная $p/c\rho$ [13]. Полагая $\rho = 10^{-3}$ г/см^3, при длительности возмущения порядка 1–2 ч [4, 5] получим, что для амплитуды волны 250 Па [4, 5] кинетическая энергия возмущения на масштабе порядка 20 км высоты стратосферного волновода (в котором, как считается, распространяется волна Лэмба) будет $3 \cdot 10^{22}$–10^{23} эрг, т.е. 7–28 Мт в тротиловом эквиваленте, что оказывается одного порядка с энергией извержения Кракатау в 1883 г. по существующей оценке [19].

Таким образом, в настоящей работе с использованием методов СДВ и ГНСС радиопросвечивания впервые продемонстрирована синхронность возмущения нижней и верхней ионосферы, распространяющимися после извержения вулкана волнами Лэмба и цунами. Воздействие на ионосферу на расстояниях в несколько тысяч км от вулкана осуществляется посредством генерируемых этими источниками (при определенных условиях) атмосферных внутренних волн, которые достигают ионосферных высот, а также присутствием пылевой компоненты извержения в плазме нижней ионосферы. Отметим, что несмотря на детальный анализ рассматриваемого события в литературе, включая работы [1, 2], настоящая работа, насколько известно авторам, является первой попыткой одновременного анализа возмущений, вызванных извержением вулкана Хунга, как в нижней, так и верхней ионосфере, что дает недостающую информацию для описания источников и механизмов генерации наблюдаемых возмущений.

Авторы благодарны IGS [20], GEONET [21] и Geoscience Australia [22] за использованные в работе данные ГНСС, а также NGDC [6] за данные глубоководных станций DART. Данные в Петропавловске-Камчатском получены Камчатским филиалом ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН” при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания # 075-00576-21. Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

1. R. S. Matoza, D. Fee, J. D. Assink et al. (Collaboration), Science. **377**(6601), 95 (2022).
2. D. R. Themens, C. Watson, N. Žagar, S. Vasylkevych, S. Elvidge, A. McCaffrey, P. Prikryl, B. Reid, A. Wood, and P. T. Jayahandran, Geophys. Res. Lett. **49**, e2022GL098158, (2022).
3. В. Е. Куницын, И. А. Нестеров, С. Л. Шалимов, Письма ЖЭТФ **94**, 657 (2011).
4. В. В. Адушкин, Ю. С. Рыбнов, А. А. Спивак, Доклады РАН **504**, 156 (2022).
5. S. N. Kulichkov, I. P. Chunchuzov, O. E. Popov et al. (Collaboration), Pure Appl. Geophys. **179**, 1533 (2022).
6. https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2022tonga.html.
7. Г. С. Голицын, В. И. Кляцкин, Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана **3**, 1044 (1967).
8. С. Л. Шалимов, И. А. Нестеров, А. М. Воронцов, Физика Земли **2**, 97 (2017).
9. A. Rozhnoi, S. Shalimov, M. Solovieva, B. Levin, M. Hayakawa, and S. Walker, J. Geophys. Res. **117**, A09313 (2012).
10. NASA, Tonga volcano plume reached the mesosphere (2022); https://gizmodo.com/tonga-eruption-blasted-volcanic-material-into-the-mesos-1848563691.
11. M. H. Stevens, J. Gumbel, C. R. Englert, K. U. Grossmann, M. Rapp, and P. Hartogh, Geophys. Res. Lett. **30**, 1546 (2003).
12. M. C. Kelley, C. E. Seyler, and M. F. Larsen, Geophys. Res. Lett. **36**, L14103 (2009).
13. A. Kozlovsky, S. Shalimov, R. Lukianova, and M. Lester, J. Geophys. Res., Space Physics **119**, 3873 (2014).
14. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика*, Наука, М. (1986).
15. M. F. Larsen, J. Geophys. Res. **107**, 1215 (2002).
16. U. S. Inan and D. L. Carpenter, J. Geophys. Res. **92**, 3293 (1987).
17. Б. А. Клумов, Г. Е. Морфил, С. И. Попель, ЖЭТФ **127**, 171 (2005).
18. Б. С. Клумов, С. В. Владимиров, Г. Е. Морфил, Письма ЖЭТФ **82**, 714 (2005).
19. C. L. Pekeris, Proc. R. Soc. Lond. A, **171**, 434 (1939).
20. https://igs.org/.
21. https://www.gsi.go.jp/.
22. https://gnss.ga.gov.au/.