

УДК: 551.510.535+ 534.21

DOI: 10.26907/rwp29.2025.80-83

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ПРОХОЖДЕНИЕ РЕЛЕЕВСКОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ НА ТАЙВАНЕ 2 АПРЕЛЯ 2024

М. В. Цедрик, А. В. Ойнац, А. В. Подлесный, С. А. Серебренникова

ИСЗФ СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

E-mail: mark7cedrick@gmail.com

Аннотация. В работе предлагается методика моделирования ионосферных возмущений, вызванных прохождением сейсмической волны по земной поверхности. Методика апробируется на примере моделирования воздействия от землетрясения, произошедшего 2 апреля 2024 года у берегов острова Тайвань. Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными, полученными на ионозонде «Ионозонд-МС».

Ключевые слова: ионосферный отклик на землетрясения; моделирование; зондирование ионосферы

MODELING OF THE IONOSPHERE RESPONSE TO THE PASSAGE OF THE RAYLEIGH WAVE CAUSED BY THE EARTHQUAKE IN TAIWAN ON APRIL 2, 2024

M. V. Cedrik, A. V. Oinats, A. V. Podlesnyi, S. A. Serebrennikova

Abstract. The paper proposes a method for modeling ionospheric perturbations caused by the passage of a seismic wave along the earth's surface. The technique is being tested on the example of modeling the impact of an earthquake that occurred on April 2, 2024 off the coast of Taiwan. Modeling results are compared with experimental data obtained on the “Ionosonde-MS” ionosonde.

Keywords: ionospheric response to earthquakes; computer simulation; ionospheric sounding

Введение

Релеевские волны, вызванные сильными землетрясениями, способны генерировать акустические волны, распространяющиеся до высот F-слоя ионосферы и вызывающие ее возмущения. При определенном стечении обстоятельств, параметры этих возмущений таковы, что их удастся зарегистрировать на данных, предоставляемых средствами диагностики ионосферы, в частности – ионозондами. Однако качество таких наблюдений сильно зависит от скважности получения данных, локального времени, удаленности от эпицентра землетрясения и других факторов [1]. Вместе с тем, распространение таких возмущений иллюстрирует механизм передачи энергии верхней атмосфере от земной поверхности. С целью более детального изучения физики этого процесса в работе проводится моделирование распространения возмущения, вызванного землетрясением магнитудой 7.2 балла по шкале Рихтера, произошедшим у побережья о. Тайвань (23.81° N 121.56° E) в 23:58 UT 2 апреля 2024 года. Отклик ионосферы на это событие был зарегистрирован ЛЧМ-ионозондом ИСЗФ СО РАН «Ионозонд-МС» [2] в режиме вертикального зондирования (ВЗ), а соответствующие этому землетрясению колебания земной поверхности были детектированы на сейсмостанции Талая (ТЛЮ), расположенной в 42 километрах от подионосферной точки ионозонда. Это дает возможность сопоставлять данные моделирования с данными реальных наблюдений.

Модель распространения инфразвука в нейтральной атмосфере

Колебания земной поверхности приводят к формированию акустической волны, которая распространяется практически вертикально вверх, т.к. скорость поверхностной волны более чем на порядок превышает скорость звука в воздухе. При распространении в атмосфере земли скорость акустических колебаний меняется с высотой в основном в результате изменения температуры и молекулярного состава атмосферы. Формула для расчета скорости звука, полученная при решении системы гидродинамических уравнений (уравнения баланса импульса, непрерывности и состояния) для газа в линейном приближении, имеет

вид $C = \sqrt{\gamma RT/M}$, где T – температура газа, M – средняя молярная масса, γ – показатель адиабаты, R – газовая постоянная.

Соответствующая задержка вариаций на заданной высоте может быть получена в виде

$$\tau(h) = \int_0^h \frac{dh}{C}. \quad (1)$$

При распространении вверх в атмосфере Земли амплитуда акустической волны должна расти экспоненциально в соответствии с законом сохранения энергии волны за счет уменьшения плотности атмосферы с высотой [3].

Диссипация акустической волны возникает из-за вязкости и теплопроводности среды и сильно зависит от ее частоты, что математически эквивалентно применению цифрового фильтра к исходному сигналу. Для определения формы такого цифрового фильтра требуется знать выражение для коэффициента поглощения инфразвуковой волны на ионосферных высотах. Аналитически оно было получено в следующем виде [4]

$$Q(h, \omega) = -20 \lg[\exp(-\int_0^h \text{Im}(m) dh)] = 10,86 \int_0^h \omega^3 \eta dh / \rho C^3 \sqrt{\omega^2 - k^2 C^2} \quad (2)$$

В формуле (2) m и k – вертикальное и горизонтальное волновые числа акустической волны с циклической частотой ω , ρ – плотность атмосферы, коэффициент поглощения выражен в децибелах. Модель сдвиговой вязкости представлена в [5]:

$$\eta = \eta_0 \sqrt{T/T_0} (1 + S/T_0) / (1 + S/T), \quad (3)$$

где $\eta_0 = 18,192 \cdot 10^{-6}$ – референсная сдвиговая вязкость при температуре 20°C , $T_0 = 293,15\text{ K}$, $S = 117\text{ K}$ – постоянная Сазерленда.

Предполагается, что акустическая волна распространяется вертикально, поэтому горизонтальная компонента волнового вектора отсутствует.

Для имитации влияния вязкости и теплопроводности на изменение спектра акустического сигнала для каждой высоты проводилась цифровая фильтрация. Далее временная развертка сигнала восстанавливалась с помощью обратного преобразования Фурье. Вариации вертикальной скорости нейтральной атмосферы на высотах ионосферы в итоге рассчитывались в соответствии с выражением (4), где функции $S_f(\omega) = \exp(-A\omega^2)$ и $S(\omega)$ – АЧХ фильтра и спектр исходного сейсмического сигнала соответственно; A – интегральный коэффициент поглощения для данной высоты.

$$s(t, h) = (\sqrt{\rho(0)/\rho(h)}) \int S(\omega) S_f(\omega) \exp(i\omega\tau(h)) \exp(-i\omega t) d\omega. \quad (4)$$

На рис. 1 показана полная высотно-временная структура вариаций вертикальной скорости атмосферы, рассчитанная по изложенному выше алгоритму. Источником вариаций был инфразвуковой сигнал, на высоте поверхности земли имеющий форму, совпадающую с формой сейсмограммы, зарегистрированной на сейсмостанции Талая. Расчеты показали, что максимальные амплитуды достигаются примерно на высоте 150 км и составляют около 18 м/с. Неоднородности наибольшей амплитуды наблюдаются в районе ~1500 секунд от начала суток. Также прослеживаются различия в высотах проявления возмущений в разные моменты времени, как на высотах около 100 км, так и на высотах выше 200-250 км.

Вариации вертикальной скорости нейтральной атмосферы в результате столкновений нейтральных молекул и атомов с ионами передаются ионосферной плазме. Будем считать, что на высотах F-области среднеширотной ионосферы плазма не может свободно перемещаться поперек линий магнитного поля. Тогда, в предположении малых вариаций электронной концентрации, уравнение непрерывности линеаризуется, и в результате можно получить решение для флуктуаций электронной концентрации в виде

$$\delta N_e = - \int_0^t \nabla \cdot (N_{e0} \cdot \mathbf{v}_i) dt. \quad (5)$$

В выражении (5) $N_e = N_{e0} + \delta N_e$, где N_e – электронная концентрация, \mathbf{v}_i – скорость ионов.

На рис. 2 приведены относительные вариации электронной концентрации в диапазоне высот 90-310 км, посчитанные по формуле (5).

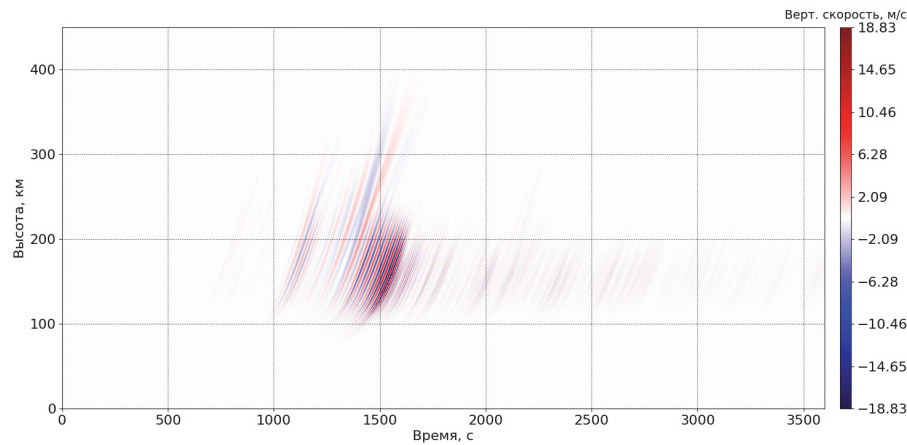


Рис. 1. Высотно-временная структура вариаций вертикальной скорости атмосферы. По горизонтальной оси показано время в секундах от начала суток 3 апреля 2024 г.

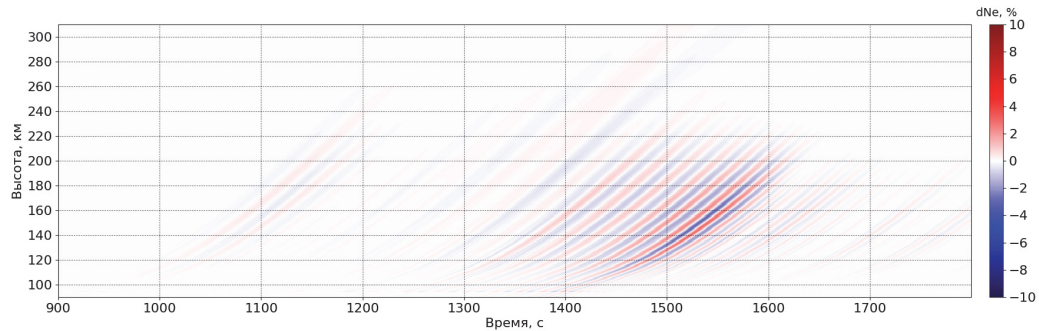


Рис. 2. Высотно-временная структура вариаций электронной концентрации в диапазоне высот 90-310 км, выраженная в процентах

Моделирование ВЧХ

Полученные высотные распределения возмущений электронной концентрации использовались для моделирования ВЧХ при вертикальном зондировании ионосферы. В качестве фоновой электронной концентрации использовался профиль, полученный из невозмущенной ВЧХ, по времени расположенной максимально близко к моменту проявления возмущения. Действующая высота отражения (задержка распространения) коротковолнового сигнала рассчитывалась в рамках метода геометрической оптики по формуле [6]

$$h_{eff} = c \frac{d}{df} \int_0^{h_r} f \cdot n(f, h) dh. \quad (6)$$

В выражении (6) $n(h)$ – показатель преломления Эплтона-Хартри без учета поглощения, c – скорость света в вакууме, f – рабочая частота радиоволны, h_r – геометрооптическая точка поворота $n(h_r) = 0$.

На рис. 3 исходные экспериментальные ионограммы сопоставлены с соответствующими модельными ВЧХ. Геомагнитное поле рассчитывалось для места расположения ионозонда по модели IGRF. Результаты моделирования качественно передают возникающее мультикасповое искажение ВЧХ. В то же время амплитуда отклонения трека от средней (невозмущенной) ВЧХ в расчетах получилась несколько выше. Положение отдельных каспов на ВЧХ не совпало с тем, что видно на реальных ионограммах. Объяснением этому может послужить то, что при моделировании использовался ряд приближений и допущений, выполняющихся в реальности с той или иной точностью.

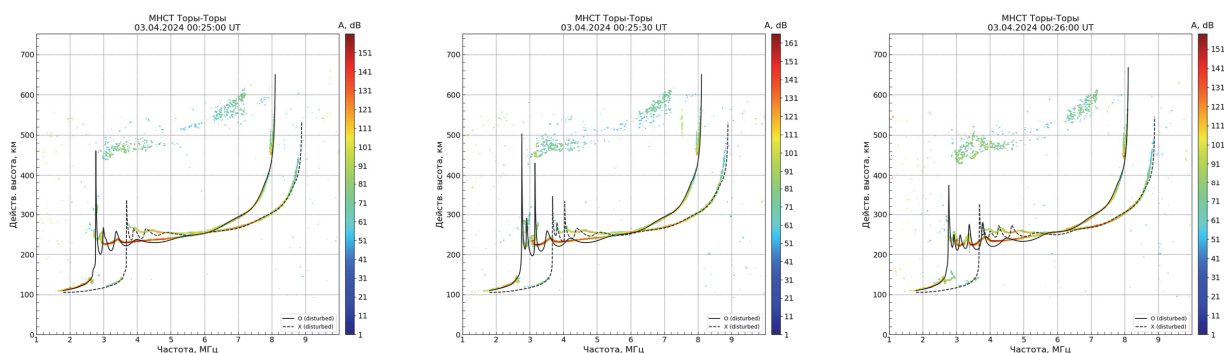


Рис. 3. Ионограммы ЛЧМ ВЗ в п. Торы, зарегистрированные 3 апреля 2024 г. в 00:25:00, 00:25:30 и 00:26:00 UT. Линиями показаны модельные ВЧХ.

Заключение

Проведено моделирование ионосферного возмущения от вертикально распространяющихся инфразвуковых волн, вызванных прохождением сейсмической волны. Учитывались вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие заряженной и нейтральной компонент ионосферы. Результаты моделирования демонстрируют качественное согласие с экспериментальными данными, что свидетельствует о применимости предложенной методики для моделирования таких физических процессов. Однако в предложенной модели распространения инфразвука и моделирования ионосферного возмущения использовано множество приближений, которые могут в реальности выполняться с той или иной точностью, чем можно объяснить количественные расхождения модельных данных с экспериментальными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-00187). Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>), полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Список литературы

1. Юсупов К.М., Акчурин А.Д., Зайнуллина А.Р. Особенности проявления на ионограммах сильных землетрясений и взрывов // Распространение радиоволн (РРВ-24). Труды конференции. – 2014. – Т. 2. – С. 68–71.
2. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В., Многофункциональный ЛЧМ ионзонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 24–31.
3. Hines, C. O., Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – Iss. 38. – P. 1441–1481,
4. O.A. Godin, Dissipation of acoustic-gravity waves: An asymptotic approach. // J. Acoust. Soc. Am. – 2014. – Vol. 136, Iss 6. – P. 411–417. <https://doi.org/10.1121/1.4902426>.
5. L. C. Sutherland and H. E. Bass, “Atmospheric absorption in the atmosphere up to 160 km” // J. Acoust. Soc. Am. – 2004. – Vol. 115. – P. 1012–1032 .
6. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / пер. с англ. И. В. Ковалевского и А. П. Кропоткина; под ред. А. А. Корчака. – М.: Мир, 1973. – 502 с