

*А. Ю. Белинская^{1✉}, А. А. Боровко¹, А. В. Ойнац², М. В. Цедрик², А. В. Подлесный²,
П. А. Дергач¹*

Сейсмо-ионосферные возмущения: данные трех землетрясений

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния сейсмических явлений на состояние ионосферы. Проведены комплексные наблюдения ионосферных возмущений, ассоциированных с тремя сильными землетрясениями, зарегистрированными в период 2024–2025 гг. Мониторинг ионосферы осуществлялся методами вертикального и наклонного зондирования на сети станций в азиатской части России. В ходе исследования установлено, что ионосферные возмущения являются откликом на распространение поверхностных волн Рэлея и регистрируются на ионограммах в виде характерных искажений. Полученные результаты демонстрируют последовательное смещение ионосферных возмущений в сторону больших частот и высот, что подтверждает их распространение снизу вверх от сейсмического источника. Показано, что характер искажений на ионограммах наклонного зондирования указывает на возможность существенного ухудшения качества коротковолновой связи после сильных землетрясений.

Ключевые слова: ионосфера, землетрясение, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, рэлеевская волна, ионосферные возмущения

A. Yu. Belinskaya^{1✉}, A. A. Borovko¹, A. V. Oinats², M. V. Cedric², A. V. Podlesny², P. A. Dergach¹

Seismo-ionospheric effects: data of three earthquake events

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
e-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper presents the results of a study investigating the impact of seismic events on the ionosphere. Comprehensive observations of ionospheric disturbances triggered by three major earthquakes between 2024 and 2025 were conducted. The ionosphere was monitored using vertical and oblique sounding techniques at a network of stations located in the Asian part of Russia. The research revealed that ionospheric disturbances are a response to the propagation of Rayleigh surface waves and are recorded on ionograms as characteristic irregularities. The obtained data demonstrate a consistent shift of ionospheric disturbances toward higher frequencies and altitudes, confirming their upward propagation from the seismic source. The distortions observed on oblique sounding ionograms indicate that major earthquakes can lead to a significant degradation in shortwave communication quality.

Keywords: ionosphere, earthquake, vertical sounding, oblique ionospheric sounding, Rayleigh wave, ionospheric disturbances

Введение

В рамках изучения механизмов взаимодействия литосферных процессов с верхней атмосферой особое внимание уделяется воздействию сейсмических явлений на состояние ионосферы. Установлено, что на расстояниях более 500 км вертикальное движение грунта, обусловленное распространением волн Рэлея, выступает доминирующим источником атмосферных возмущений, распространяющихся вверх в диапазоне акустических волн (например, [1]). Взаимодействие данных акустических волн с ионосферной плазмой происходит за счет столкновений нейтральных частиц и ионов, что инициирует периодические флуктуации плотности электронов в ионосфере, синхронизированные с прохождением акустических возмущений. Распространение ионосферных возмущений вдоль поверхности Земли демонстрирует характерные особенности волн Рэлея. Ионосферные возмущения, вызванные короткопериодной фазой волн Рэлея, регистрировались методом доплеровского зондирования с использованием отражения высокочастотных (ВЧ) радиоволн (например, [2]). При этом доплеровское зондирование имеет существенные ограничения: высота регистрации возмущений определяется профилем плотности и частотой зондирования, а при многочастотных измерениях возникает неоднозначность интерпретации [3]. Кроме того, метод дает неполную картину высотного профиля возмущений и вертикального распространения инфразвука. Анализ ионограмм вертикального и наклонного зондирования в сочетании с многопунктовыми наблюдениями позволяет детально исследовать структуру и динамику ионосферных возмущений, обеспечивая комплексный взгляд на их пространственно-временное развитие.

Исходя из скорости распространения ионосферных откликов от землетрясений, регистрируемых на картах полного электронного содержания, в данных ионосферных доплеровских радаров и ионозондов, принято считать, что за их появление несут ответственность поверхностные рэлеевские волны, имеющие скорость $\sim 3-4$ км/с [4].

Наблюдения

Мониторинг ионосферы осуществлялся методами вертикального зондирования (ВЗ) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ТОРҮ, п. Торы) с частотой 15 с и в Обсерватории «Солнечно-Земной физики» ИНГГ СО РАН (NVS, г. Новосибирск) с частотой 1 мин и методом наклонного зондирования (НЗ) на радиотрассе Новосибирск-Торы (NSK-TORY) с частотой 1 мин. Все наблюдения выполнялись при помощи ЛЧМ-ионозондов «Ионозонд-МС» [5].

Дополнительно привлекались данные, полученные на сейсмологическом пункте (СП) в г. Новосибирск: скорость вертикального смещения (мкм/с) для двух землетрясений 28.03.2025 г. и 29.07.2025 г.

Координаты пунктов наблюдения и расстояние до эпицентра приведены в табл. 1.

Таблица 1. Координаты пунктов наблюдения и расстояние до эпицентра землетрясения

Пункт наблюдений	Вид наблюдений	Широта с.ш.	Долгота в.д.	Расстояние от эпицентра, км		
				02.04.2024	28.03.2025	29.07.2025
п. Торы (TORY)	ВЗ	51,81	103,08	3487,3	3370,9	3806,6
Средняя точка (NVS-TORY)	НЗ	53,74	93,51	4065,5	3534,6	4297,7
г. Новосибирск (NVS)	СП, ВЗ	54,85	83,23	4667,5	3802,6	4827,2

Для анализа были выбраны три землетрясения, для которых велись полноценные непрерывные 1-минутные наблюдения ионосферы. Величину сейсмической энергии E сильного землетрясения можно рассчитать по формуле [6] $\lg W = 5 + 1.5 \cdot M_w$, где M_w – магнитуда события. Известно, что сейсмическая энергия составляет примерно 1% общей энергии источника W_0 [7-8], таким образом для каждого из рассмотренных событий была оценена величина общей энергии источника (см. табл. 2).

Таблица 2. Характеристики землетрясений

Место; продолжительность (с)	Дата	Время UT	Эпицентр		Глубина км	Магнитуда M_w	W_0 Дж
			Широта с.ш.	Долгота в.д.			
Хуалянь, Тайвань; 35	02.04.2024	23:58	23,819	121,562	40	7,4	$\sim 1,26 \times 10^{18}$
Мандалай, Мьянма; 80	28.03.2025	06:21	22,001	95,925	10	7,9	$\sim 7,08 \times 10^{18}$
Камчатка, Россия; 270	29.07.2025	23:25	52,473	160,396	35	8,8	$\sim 1,58 \times 10^{20}$

Результаты

В день землетрясения на ионограммах вертикального и наклонного зондирования регистрировались среднемасштабные возмущения, которые не наблюдались ни в предыдущие, ни в последующие дни. Эффект отражается на ионограммах в виде многочисленных волнообразных возмущений основного следа отражения (рис. 1 а, б, в). Каждый пик действующей высоты отражения на ионограмме ВЗ соответствует отражению от точки изгиба на профиле плазменной частоты F-слоя. На ионограммах НЗ наблюдаются расслоения сигнала (рис. 1 г, д). Такие аномальные ионограммы фиксировались в отдельные моменты времени после землетрясения.

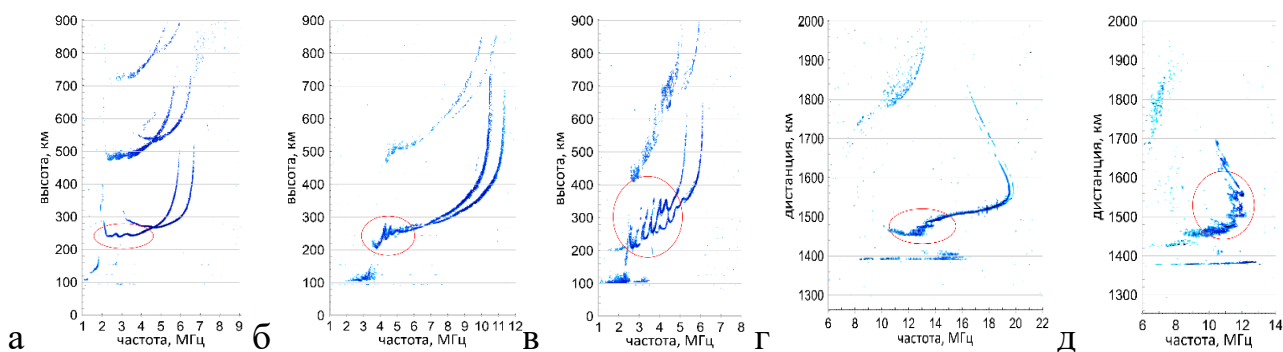


Рис. 1. Ионограммы вертикального зондирования в Новосибирске
а) 03.04.2024 00:33UTC, б) 28.03.2025 06:50UTC, в) 30.07.2025 00:02UTC и ионограммы
наклонного зондирования на трассе Новосибирск-Торы
г) 28.03.2025 06:48UTC, д) 29.07.2025 23:58UTC. Красным отмечены видоизмененные следы
отражения

Для каждого события были построены Н-тар по данным ВЗ для станции NVS и TORY, на которых цветом показана действующая высота отражения радиосигнала на определенной частоте в конкретный момент времени. Такая визуализация помогает определить периоды, когда наблюдались возмущения в ионосфере, а также на каких частотах и высотах они возникали.

Землетрясение 02.04.2024 г., 23:58UTC

Отклик на землетрясение 02.04.2024 г. в ионосфере был зафиксирован как в г. Новосибирске, так и в п. Торы (рис. 2).

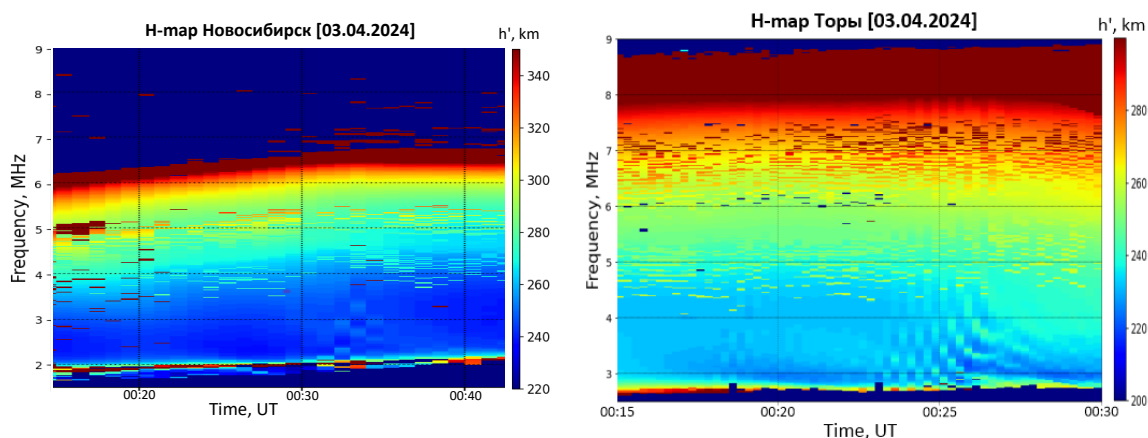


Рис. 2. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные 03.04.2024 г. при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б)

Прохождение ионосферного возмущения в Новосибирске началось в 00:32UTC и закончилось в 00:35UTC. Таким образом, эффект наблюдался через ~ 34 мин после основного толчка. В Торах прохождение ионосферного возмущения было более выраженными и продолжалось с 00:23UTC до 00:27UTC. В средней точке трассы NVS – TORY значимых возмущений в эти периоды не наблю-

далось. Интересно, что небольшое расслоение было в 03:50UTC. С учетом того, что рэлеевская волна на поверхности Земли распространяются примерно в 10 раз быстрее звука в воздухе ($\sim 3\text{--}4\text{ км/с}$) [9], есть вероятность, что здесь наблюдались повторные отклики рэлеевской волны пришедшей, либо со стороны короткой дуги большого радиуса, либо с другой стороны Земли по длинной дуге большого радиуса.

Землетрясение 28.03.2025г., 06:21UTC

На рис. 3 представлены скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на сейсмологическом пункте Новосибирске 28.03.2025 г. Первые продольные сейсмические сигналы (Р-волны) в Новосибирске были зафиксированы в 6:27:40UTC. С точки зрения анализа ионосферных эффектов стоит отметить, что приход поперечных S-волн отмечается 06:33:23UTC, и максимальные амплитуды поверхностной волны Рэ-лея (R-волны) наблюдались в период с 6:40:18UTC до 06:47UTC (нижняя панель рис. 3).

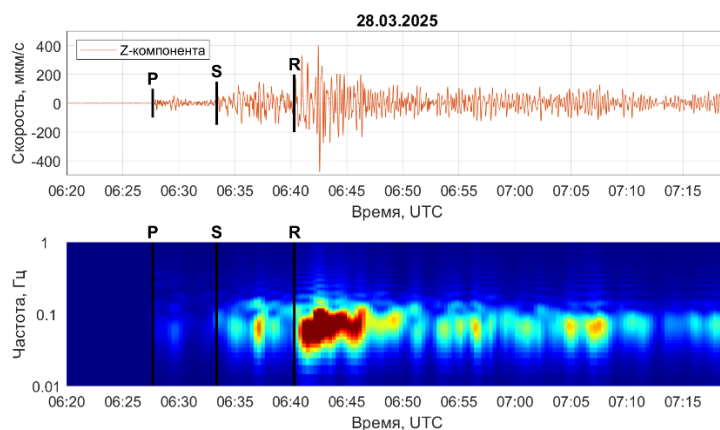


Рис. 3. Скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на СП Новосибирске 28.03.2025 г. Черными линиями обозначены времена приходов Р-, S- и R- волн

В Новосибирске возмущения в ионосфере начались в 6:40UTC (рис. 4а). Эти искажения, вероятно, соответствуют эффектам от прохождения сейсмической S-волны. Наиболее четкие искажения наблюдались с 6:48UTC до 06:54 UTC. И затем постепенно исчезают к 07:20UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над Новосибирском наблюдался через ~ 27 минут после основного толчка землетрясения и позже на 8 мин, чем в сейсмоданных.

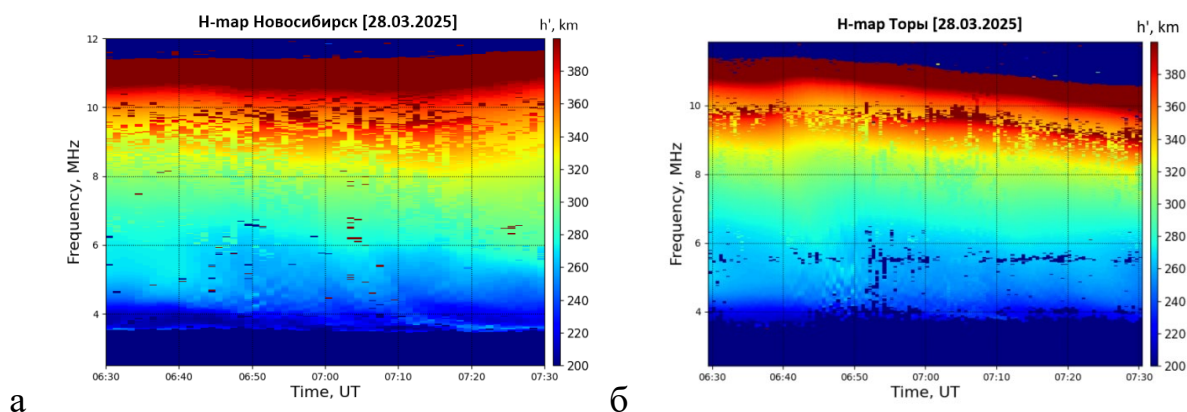


Рис. 4. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б) 28.03.2025 г.

Небольшие искажения на ионограммах в Торах видны уже в 06:41UTC (рис. 4б). Однако наиболее отчетливо искажения становятся видны с 06:45UTC, возмущения длятся до 07:08UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над Торами наблюдался через ~ 24 минуты после основного толчка землетрясения.

На трассе Новосибирск-Торы в средней точке расслоения наблюдались с 06:42UTC до 07:08UTC, с наиболее четким проявлением волны Рэлея в период 06:47UTC - 06:50UTC. Таким образом, отклик на Рэлеевскую волну на высотах ионосферы над средней точкой трассы Новосибирск-Торы был на 1 минуту раньше, чем в Новосибирске, и 2 минуты позже, чем в Торах.

Землетрясение 29.07.2025г., 23:25UTC

Первые результаты наблюдений за геофизическими эффектами сильного землетрясения 29.07.2025 г. на Камчатке приведены в [10]. Подробный анализ возмущений в ионосфере после этого землетрясения приведен в публикациях [11, 12].

Отметим, что времена прихода сейсмических волн в Новосибирск были следующие (см. рис. 5): Р-волна в 23:32:51UTC, S-волна в 23:39:19UTC и волна Рэлея в 23:49:00UTC.

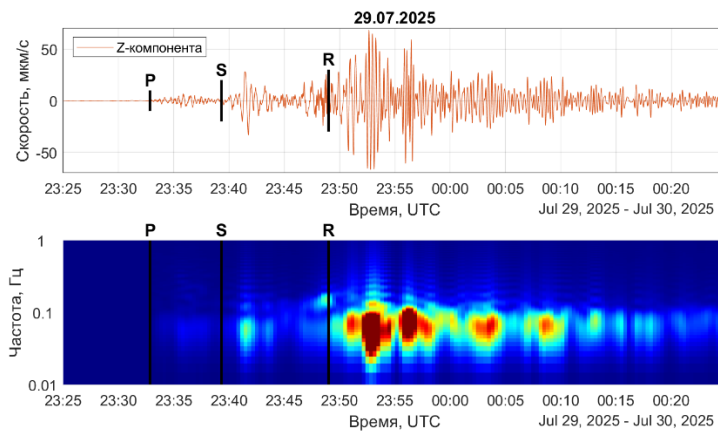


Рис. 5. Скорость вертикального смещения (верхняя панель) и спектрограмма (нижняя панель), зарегистрированные на СП Новосибирске 29 - 30.07.2025 г. Черными линиями обозначены времена приходов P-, S- и R- волн

Над Новосибирском первые небольшие искажения в нижней части следов начали появляться примерно в 23:41UTC 29.07.2025 г. (Р-волна). С 23:54UTC 29.07.2025 г. до 00:12UTC 30.07.2025 г. наблюдалась многопиковая структура (волна Рэля). Таким образом, отклик на рэлеевскую волну в ионосфере наблюдали через ~ 29 минут после основного толчка землетрясения и через ~ 5 минут после прихода R-волны по сейсмоданным.

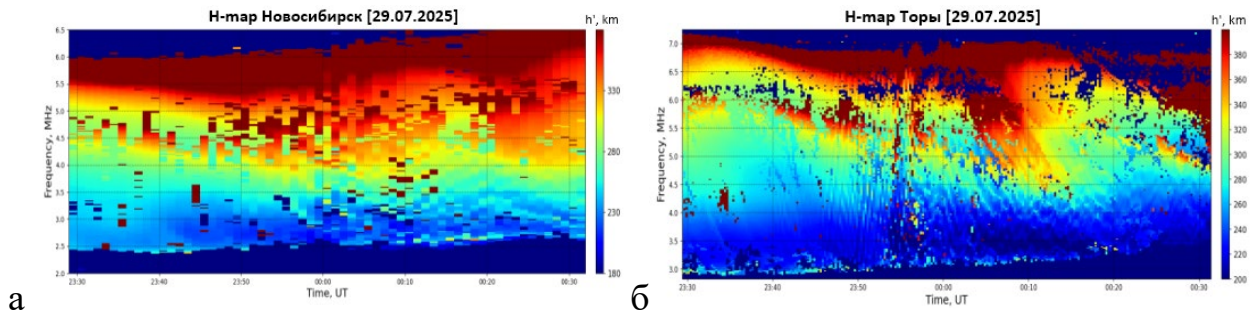


Рис. 6. Вариации действующей высоты отражения КВ радиоволн, полученные при ВЗ ионосферы в Новосибирске (а) и Торах (б) 29 – 30.07.2025 г.

На ионосферной станции в п. Торы (см. рис. 6б) с 23:40UTC наблюдались небольшие искажения, которые соответствуют прохождению продольной волны (Р-волны). Далее наблюдались более сильные искажения, соответствующие прохождению поперечной волны (S-волны). Начиная примерно с 23:51UTC на следах наблюдается многопиковая структура, которая соответствует волне Рэля. Ионосферные возмущения наблюдались в той или иной степени на протяжении нескольких часов. Таким образом, над п. Торы эффект наблюдался через ~ 26 минут после основного толчка.

Отчетливые эффекты от прохождения инфразвуковой волны в средней точке трассы Новосибирск – Тора наблюдались, начиная с 23:55UTC (через ~ 30 минут после основного толчка) до 00:19UTC 30.07.2025 г.

Обсуждение

Представленные результаты в целом хорошо соответствуют данными, ранее опубликованными другими авторами с использованием данных вертикального зондирования (ВЗ), полученных после сильных землетрясений [4, 13].

Для всех трех землетрясений, которые рассматриваются в данной работе, неоднородности ионосферы, имеющие вид многопиковой структуры, последовательно смещались в сторону больших частот/высот. Это позволяет предположить, что соответствующее ионосферное возмущение распространялось снизу-вверх от сверхзвукового наземного источника – сейсмической волны. Время регистрации возмущения в ионосфере над Новосибирском отличается от наземной регистрации рэлеевской волны по сейсмоданным на 8 и 5 мин (для событий в марте и июле 2025 г.), что примерно соответствует времени, необходимому для подъема инфразвуковой волны вертикально до ионосферных высот.

Искажения следов на ионограммах вертикального зондирования сначала регистрировались в Торах, а затем – на станции в Новосибирске. Время задержки в двух случаях составило 3 мин, а в случае слабого землетрясения 02.04.2024 г. – 9 мин. В целом, эффект от землетрясения в Торах начинали наблюдать через ~ 24 - 26 минут. Полученные данные демонстрируют расхождение с результатами наблюдений, проведенных на Иркутской ионосферной станции после землетрясения у побережья Японии 11.03.2011 г. В указанном событии основной толчок зафиксирован в 05:46:23UTC (магнитуда $M_w = 9,1$), а ионосферные возмущения были зарегистрированы в 06:01UTC на расстоянии 3400 км от эпицентра – спустя приблизительно 14 минут после основного толчка [14]. Ключевым фактором, объясняющим наблюдаемые различия, может служить значительно более высокая общая энергия очага японского землетрясения ($\sim 4,47 \times 10^{20}$ Дж), которая существенно превышает энергетические параметры событий, рассматриваемых в рамках настоящего исследования. Это указывает на возможную зависимость появления ионосферных эффектов от энергетического потенциала сейсмического источника.

Согласно ионограммам НЗ, полученным на трассе Новосибирск – Тора, наблюдались искажения следа 1F2, указывающие на значительную стратификацию ионосферной F-области вблизи средней точки радиотрассы. Высокое временное разрешение наблюдений позволяет предположить, что соответствующие ионосферные возмущения распространялись вверх и являлись результатом прохождения сейсмической волны. После землетрясения на Камчатке, искажения ионограмм в Новосибирске было отмечено раньше, чем в средней точке радиотрассы Новосибирск – Тора, когда как для двух других событий последовательность была другой. На трассах Магадан/Норильск – Новосибирск эффектов землетрясений замечено не было. Эти два момента требуют дополнительного изучения.

В дальнейшем полученные результаты можно будет использовать для сравнения с модельными расчетами. Например, в работе [15] представлены результаты

моделирования ионосферного отклика на сейсмическую волну после землетрясения на Тайване в 2024 году с учетом диссипации энергии акустической волны из-за вязкости и теплопроводности. Полученные высотно-временные распределения возмущенной электронной концентрации затем использовали для моделирования ионограмм ВЗ. Было продемонстрировано хорошее качественное соответствие между расчетными зависимостями и наблюдаемыми ионограммами.

Характер искажений на ионограммах НЗ свидетельствует о том, что качество КВ-связи может существенно ухудшиться после сильных землетрясений. Это должно учитываться при прогнозировании каналов радиосвязи, которые могут попасть в зону влияния сейсмических и подобных им (например, подземных мощных взрывов) событий.

Заключение.

В результате проведенного исследования подтверждено, что сейсмические явления оказывают влияние на состояние ионосферы, проявляющееся в формировании характерных неоднородностей и возмущений. Показано, что ионосферные эффекты, вызванные землетрясениями, регистрируются методами вертикального и наклонного зондирования. Установлено, что наблюдается последовательное смещение ионосферных возмущений в сторону больших частот и высот, что подтверждает их распространение снизу-вверх от сейсмического источника. Общая задержка наблюдения эффектов в ионосфере складывается из времени, которое необходимо сейсмической волне (Р-, S- или волне Рэлея), чтобы добежать по поверхности Земли до подионосферной точки, и времени распространения акустической волны от поверхности до высот ионосферы со скоростью звука.

Полученные результаты будут полезны для прогнозирования качества радиосвязи в регионах, которые могут попасть в зону влияния сейсмических явлений. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются сравнение наблюдаемых эффектов с модельными расчетами, изучение механизмов формирования ионосферных неоднородностей и разработка методов оперативного прогнозирования ионосферных возмущений. Дополнительную информацию о воздействии акустических волн на ионосферу можно получить с помощью конвертирования ионограммы в $Ne(h)$ профиль и изучения особенности вертикального распространения акустических волн, порожденных рэлеевскими волнами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты FWZZ-2026-0051, FWSE-2026-0003 и FWZZ-2026-0052). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН ([https:// ckprf.ru/catalog/ckp/3056/](https://ckprf.ru/catalog/ckp/3056/)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary // Ann. Geophys. – 1985 – V. 3(6) – P. 673–688.

2. Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J. Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech Republic excited by the 2011 Tohoku earthquake // *J. Geophys. Res.* – 2012 – V. 117 – A08319. – DOI: 10.1029/2012JA017767.
3. Artru J., Farges T., Lognonné P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: Propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modelling // *Geophys. J. Int.* – 2004 – V. 158 – P. 1067–1077.
4. Maruyama T., Tsugawa T., Kato H. et al. Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // *J. Geophys. Res.* – 2012 – V. 117 – A08306. – DOI: 10.1029/2012JA017952.
5. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // *Гелиогеофизические исследования*. – 2013 – № 4 – С. 24–31.
6. Шебалин Н.В. Сейсмология – наука о землетрясениях. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
7. Пасечник И.П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – М.: Наука, 1970. – 191 с.
8. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // *Докл. АН СССР*. – 1985 – Т. 283, № 5 – С. 1153–1156.
9. Bourdillon A., Occhipinti G., Molinie J.-P., Rannou V. HF radar detection of infrasonic waves generated in the ionosphere by the 28 March 2005 Sumatra earthquake // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2014 – V. 109 – P. 75–79.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Тихонова А.В. Первые результаты наблюдений за геофизическими эффектами сильного ($M = 8,8$) землетрясения 29.07.2025 г. на Камчатке // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2025 – Т. 24, № 3 – С. 81–92. – DOI: 10.21455/GPB2025.3-6.
11. Oinats A.V., Cedric M.V., Dyukov I.Yu., Podlesny A.V., Belinskaya A.Yu., Borovko A.A., Sorokin A.G., Dobrynin V.A., Dergach P.A. Ionospheric Response on the Seismic Wave Induced by Kamchatka Earthquake on July 30, 2025 // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2026 (в печати).
12. Ойнац А.В., Цедрик М.В., Дюков И.Ю., Подлесный А.В., Белинская А.Ю., Сорокин А.Г., Добрынин В.А. Обзор эффектов в ионосфере, вызванных прохождением рэлеевской волны от землетрясения на Камчатке 30 июля 2025 г. // *Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. – Москва: ИКИ РАН, 2025. – С. 460. – DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
13. Maruyama T., Shinagawa H. Infrasonic sounds excited by seismic waves of the 2011 Tohoku-oki earthquake as visualized in ionograms // *J. Geophys. Res.* – 2014 – V. 119 – P. 4094–4108. – DOI: 10.1002/2013JA019707.
14. Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20 UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* – 2015 – V. 132 – P. 106–115. – DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.004.
15. Цедрик М.В., Ойнац А.В., Подлесный А.В., Серебренникова С.А. Моделирование отклика ионосферы на прохождение Рэлеевской волны, вызванной землетрясением на Тайване 2 апреля 2024 года // *Труды конференции РРВ-29 (30.06–04.07.2025, Казань)*. – С. 80–83. – DOI: 10.26907/rwp29.2025.80-83.

© А. Ю. Белинская, А. А. Боровко, А. В. Ойнац, М. В. Цедрик, А. В. Подлесный,
П. А. Дергач, 2026