

УДК 550.510.53+550.38+550.34

ОБ ИОНОСФЕРНОМ ОТКЛИКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ФИЛИППИНАХ С НОЯБРЯ ПО ДЕКАБРЬ 2023 г.

© 2024 г. С. А. Рябова^{1,2, *}, С. Л. Шалимов²

¹Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 17.02.2024 г.

Принята к публикации 18.02.2024 г.

Наземными магнитометрическими измерениями исследованы ионосферные возмущения, наблюдаемые с ноября по декабрь 2023 г. после ряда достаточно сильных землетрясений в районе интенсивной сейсмической активности на Филиппинах. Показано, что наблюдается устойчивая картина появления магнитных возмущений от событий с различными магнитудами (от $M_w = 6$ до $M_w = 7.4$), содержащая короткопериодные и длиннопериодные вариации, обусловленные вариациями токовых систем нижней ионосферы. Установлено, что эти вариации принадлежат разным ветвям атмосферных акустико-гравитационных волн — акустических и внутренних соответственно. Показано, что происхождение возмущений акустического диапазона может быть связано с приходом сейсмических волн Релея, являющихся источником акустических колебаний, в то время как оцениваемые скорости атмосферных внутренних волн соответствуют их генерации непосредственно в эпицентрах событий. Проведенные магнитометрические измерения позволяют регистрировать ионосферные возмущения от событий заметно меньшей магнитуды по сравнению с методом радиопросвечивания посредством глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: землетрясение, геомагнитное поле, вейвлет-анализ, сейсмическая волна Релея, атмосферная внутренняя волна.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724060038>, **EDN:** RGUIBK

ВВЕДЕНИЕ

Земная ионосфера является чувствительным индикатором различного рода возмущений в литосфере и гидросфере Земли как природного, так и антропогенного происхождения. К естественным источникам возмущений относят землетрясения, цунами, извержения вулканов, тропические циклоны [Ясюкевич и др., 2013; Шалимов и др., 2019; Спивак и др., 2020; Спивак, Рябова, 2020; Соловьева и др., 2022], а к искусственным — промышленные и ядерные взрывы, запуски космических ракет [Гохберг, Шалимов, 2008; Ozeki, Neke, 2010]. Основным посредником, связывающим такие источники с ионосферой, считаются акустико-гравитационные волны (АГВ). Как правило, регистрация ионосферных возмущений проводится с использованием современных методов дистанционного зондирования верхней

атмосферы, например, методом радиопросвечивания посредством глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

В частности, с помощью ГНСС достаточно хорошо изучены ионосферные отклики, сопровождающие сильные землетрясения. Показано, что они имеют многомодовую структуру и содержат сигналы от прохождения сейсмической волны Релея, атмосферных акустической и внутренней гравитационной мод [Гохберг, Шалимов, 2008]. Если отклик ионосферы на землетрясения регистрируется вблизи эпицентра через 10–15 мин после основного толчка, то он имеет N -образную форму, которая соответствует классической форме ударной волны. Вместе с тем, используя методы ГНСС-радиопросвечивания, не удается уверенно зарегистрировать вариации полного электронного содержания (Total Electron Content, TEC) для землетрясений

с магнитудой меньше 6.5 [Perevalova et al., 2014]. Считается, что вероятность регистрации ионосферного отклика на землетрясения с магнитудами, близкими к указанному порогу, сильно зависит от механизма очага и гелио-геофизической обстановки в момент землетрясения.

В то же время в ряде работ по исследованию отклика ТЕС на мощные подземные взрывы, включая ядерные, показана возможность детектирования событий, имеющих меньшую магнитуду (см., например, работу [Park et al., 2014], где зарегистрирован волновой отклик ТЕС на два подземных ядерных взрыва в Северной Корее – 2009 г. с магнитудой 4.7 и 2006 г. с магнитудой 4.3). Кроме того, по данным низкоорбитальной радиотомографии зафиксированы ионосферные возмущения после промышленных взрывов на Кольском полуострове с магнитудами 2.4 и 3, которые интерпретировались как долгоживущие искусственные возмущения, связанные с геострофической адаптацией возмущений во вращающейся атмосфере [Гохберг, Шалимов, 2008].

Таким образом можно ожидать, что при использовании метода ГНСС-радиопросвечивания будут наблюдаться некоторые отличия в характеристиках ионосферных возмущений для землетрясений и взрывов. Подтверждением этого факта являются результаты кросс-вейвлет анализа волновых форм вариаций ТЕС, выделенных после северо-корейских подземных ядерных взрывов 2006 и 2009 гг. и после землетрясения Тохоку 2011 г. [Park et al., 2014], показавшие высокую когерентность между волновыми откликами на оба ядерных взрыва и значительную разницу между откликами на взрывы и землетрясение. Далее, проведенный с использованием плотных сетей ГНСС-приемников анализ ионосферных откликов на искусственные литосферные возмущения (взрывы) различной природы и достаточно малой магнитуды показал, что при регистрации этих откликов необходимо учитывать возможную анизотропию распространения атмосферных возмущений на ионосферных высотах как из-за крупномасштабных ветровых структур, так и из-за наклона геомагнитного поля [Падохин, Шалимов, 2023].

В связи с этим дальнейшее исследование ионосферных откликов на мощные литосферные возмущения представляет значительный интерес. В настоящей работе с помощью наземных магнитометров исследованы ионосферные возмущения, наблюдаемые после десяти

достаточно сильных землетрясений в районе Филиппинских островов, шесть из которых имеют магнитуду меньше 6.5.

ОПИСАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Рассматриваемый при выполнении настоящих исследований регион, Филиппинские острова, находится в тихоокеанском “огненном кольце” и является одним из наиболее сложных в тектоническом отношении районов Земли, где происходит тройное сочленение Австралийской тектонической плиты и океанических Тихоокеанской и Филиппинской тектонических плит [Qin, Yin, 2011]. Относительно небольшая Филиппинская плита движется на северо-запад по направлению к Евразийской плите со скоростью 6–8 см в год. Дополнительное механическое напряжение в регионе создает Тихоокеанская тектоническая плита, которая движется в том же направлении [Zhang et al., 2022]. Получается, что Филиппинские острова, да и весь индонезийский регион находятся в зажатом состоянии, что выражается в сбросе напряжения через многочисленные землетрясения.

В настоящей работе рассматриваются землетрясения, которые были зарегистрированы в Филиппинском институте вулканологии и сейсмологии (PHIVOLCS)¹. Предполагалось, что геомагнитный эффект будет наблюдаться при достаточно сильных сейсмических событиях [Рябова, Шалимов, 2022; Спивак, Рябова, 2019а; 2019б], поэтому при выполнении исследований выбирались землетрясения моментной магнитудой (т.е. магнитудой, основанной на сейсмическом моменте землетрясения) больше или равной 6. С целью отбора событий был проанализирован каталог PHIVOLCS² за период с ноября по декабрь 2023 г.

Самое мощное землетрясение за рассматриваемый интервал времени произошло 02.12.2023 г. в 22:37 по Тихоокеанскому времени (14:37 UT) у острова Минданао. По оценкам геологической службы США, магнитуда землетрясения составила 7.6³, а по оценкам PHIVOLCS его магнитуда составила 7.4. Эпицентр события располагался в 110 км от города Бутуан провинции Агусан-дель-Норте⁴ и 29 км

¹ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

² <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lff4/executive>

⁴ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lff4/executive>

севернее города Хинатуана в провинции Суригао-дель-Сур⁵. Географические координаты эпицентра: 8.487° с.ш. 126.351° в.д. Глубина гипоцентра: 40 км⁶.

Это сейсмическое событие произошло в результате неглубокого разлома наклонного надвига, вероятно, вдоль границы субдукции Филиппинского желоба⁷. В этом месте Филиппинская океаническая плита перемещается с запада на северо-запад со скоростью около 103 мм в год по отношению к Зондской плите. На основе модели конечного разлома⁸ предполагается, что разрыв произошел вокруг эллиптической области размером 80 × 80 км. Максимальное смещение было сосредоточено вокруг эпицентра, хотя и с небольшим наклоном, его величина была оценена в 1.8 м.

После основного толчка регистрировалась афтершоковая активность к юго-востоку от основного толчка⁹. На 16:00 по тихоокеанскому времени 16.12.2023 г. PHIVOLCS зафиксировала 8403 афтершока¹⁰, а по данным Геологической службы США по состоянию на 29.12.2023 г. после землетрясения было зарегистрировано 425 афтершоков моментной магнитудой более 4.5¹¹. Самый крупный афтершок магнитудой 6.9 произошел 4 декабря к северу от афтершоковой последовательности¹². PHIVOLCS выделил это событие как отдельное землетрясение¹³. Подземные толчки были зарегистрированы в 03:49 4 декабря на глубине около 30 км в Филиппинском море у северо-восточного побережья острова Минданао (недалеко от побережья муниципалитета Кагвейта в провинции Суригао-дель-Сур)¹⁴. Эпицентр нахо-

дился примерно в 35 км к востоку-северо-востоку от населенного пункта Арас-асана¹⁵.

За период с 2 по 31 декабря 2023 г. кроме землетрясения 4 декабря были зарегистрированы следующие афтершоки моментной магнитудой больше или равной 6: афтершок магнитудой 6 (0:03 LT 03.12.2023 г.), афтершок магнитудой 6.1 (1:40 LT 03.12.2023 г.), афтершок магнитудой 6.3 (2:09 LT 03.12.2023 г.), афтершок магнитудой 6 (4:52 LT 03.12.2023 г.), афтершок магнитудой 6.6 (18:35 LT 03.12.2023 г.), афтершок магнитудой 6 (22:35 LT 03.12.2023 г.)¹⁶. Месторасположение эпицентров афтершоков, их географические координаты представлены в табл. 1.

После землетрясения 2 декабря были зарегистрированы волны цунами. На острове Мавес (Филиппины) наблюдалось цунами высотой 64 см¹⁷. В городе Давао (Филиппины) высота цунами достигла 8 см, а в населенном пункте Лоугане (Филиппины) высота цунами достигла 18 см¹⁸. Цунами высотой 2 см также было зафиксировано в городе Легаспи (Филиппины)¹⁹. В Японии высота цунами достигла 40 см на острове Хатидзе-дзиме и 20 см в поселке Кусимото в префектуре Вакаяма и в городе Тосасимидзу в префектуре Коти²⁰. Цунами также достигло высоты 1 см на острове Малакал (микронезийское государство Палау)²¹.

За две недели до землетрясения 2 декабря, произошедшего в регионе провинции Суригао-дель-Сур, было зарегистрировано землетрясение в соседнем регионе в муниципалитете Сарангани в провинции Западный Давао²². Подземные толчки этого подводного сейсмического

⁵ <https://www.ndbcnews.com.ph/news/magnitude-74-quake-rocks-mindanao-over-370-aftershocks-recorded>

⁶ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

⁷ <https://newsinfo.inquirer.net/1869737/phivolcs-movement-in-ph-trench-caused-7-4-magnitude-quake-in-hinatuan>

⁸ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lff4/executive>

⁹ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/8042630/2023-12-02/14h37/magnitude6-Philippines.html>

¹⁰ <https://monitoring-dashboards.ndrrmc.gov.ph/>

¹¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=6.52819,123.35449&extent=10.79554,129.77051&range=search&baseLayer=terrain&timeZone=utc&search=%7B%22name%22:%22Search%20Results%22,%22params%22:%7B%22endtime%22:%222025-12-23T14:37:03.945Z%22,%22latitude%22:8.5266,%22longitude%22:126.4487,%22maxradiuskm%22:250,%22minmagnitude%22:4.5,%22maxmagnitude%22:7.5,%22starttime%22:%222023-12-01T14:37:03.945Z%22%7D%7D>

¹² <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lff4/executive>

¹³ <https://www.cnnphilippines.com/news/2023/12/4/Surigao-del-Sur-separate-quake.html>

¹⁴ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

¹⁵ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lff4/executive>

¹⁶ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

¹⁷ <https://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php/tsunami/tsunami-advisory-and-warning3>

¹⁸ <https://www.tsunami.gov/events/PHEB/2023/12/02/23336002/3/WPEA40/WPEA40.txt>; <https://www.philstar.com/headlines/2023/12/03/2316134/tsunami-warning-lifted-after-magnitude-74-quake-strikes-surigao-del-sur>

¹⁹ <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20231203/k10014276341000.html>

²⁰ <https://www.aljazeera.com/news/2023/12/2/powerful-7-5-magnitude-earthquake-strikes-southern-philippines>; <https://www.japantimes.co.jp/news/2023/12/03/japan/science-health/quake-philippines-aftershocks/>

²¹ <https://www.tsunami.gov/events/PHEB/2023/12/02/23336002/3/WPEA40/WPEA40.txt>

²² <https://reliefweb.int/report/philippines/m68-earthquake-davao-occidental-philippines-flash-update-1-17-nov-2023-1930-hrs-utc-7>

Таблица 1. Параметры землетрясений с моментной магнитудой больше или равной 6, произошедших в Филиппинском регионе в период с ноября по декабрь 2023 г. (указано тихоокеанское время (UTC+8 часов))

№	Число	Магнитуда	Время	Широта, с.ш., град.	Долгота, в.д., град.	Место
1	17.11.2023	6.8	16:14	5.38	125.24	28 км южнее острова Сарангани (муниципалитет Сарангани, провинция Западный Давао)
2	22.11.2023	6.1	10:48	2.01	126.97	413 км южнее острова Балут (муниципалитет Сарангани, провинция Западный Давао)
3	02.12.2023	7.4	22:37	8.44	126.59	29 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
4	03.12.2023	6.4	00:03	8.5	126.95	73 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
5	03.12.2023	6.1	01:40	8.42	126.9	63 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
6	03.12.2023	6.3	02:09	8.51	127.43	122 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
7	03.12.2023	6	04:52	8.4	127.12	86 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
8	03.12.2023	6.6	18:35	8.49	126.95	69 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
9	03.12.2023	6	22:35	8.76	127.46	131 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)
10	04.12.2023	6.8	03:49	8.96	126.91	67 км севернее города Хинатуана (провинция Суригао-дель-Сур)

события наблюдались в 16:14 LT 17.11.2023 г.²³. По оценкам PHIVOLCS магнитуда землетрясения составила 6.8²⁴. Эпицентр располагался в 60 км южнее города Генерал-Сантос в провинции Южный Котабатто²⁵. Географические координаты эпицентра: 5.38 с.ш., 125.24 в.д. Глубина гипоцентра: 78 км²⁶. По состоянию на 12:00 UT

22.11.2023 г. PHIVOLCS зафиксировала 113 афтершоков²⁷.

Еще одно из рассматриваемых событий — это подводное землетрясение магнитудой 6.1, произошедшее у острова Балут в муниципалитете Сарангани в провинции Западный Давао в 10:48 LT 22.11.2023 г.²⁸. Эпицентр землетрясения находился в 413 км южнее острова Балут в провинции Сарангани и в 115 км от Тернате (Молуккские острова, Индонезия)²⁹. Геогра-

²³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000lp12/executive>

²⁴ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

²⁵ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000lp12/executive>

²⁶ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/8017795/2023-11-17/08h14/magnitude6-Philippines.html>

²⁷ <https://www.pna.gov.ph/articles/1214093>

²⁸ <https://www.cnnphilippines.com/news/2023/11/22/6.1-quake-Sarangani.html>

²⁹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000lp12/executive>

фические координаты эпицентра: 2.01° с.ш. 126.97 в.д.³⁰. Очаг землетрясения находился на средней глубине 100 км.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

При анализе последствий рассматриваемых сейсмических событий привлекались данные системы сбора магнитных данных в реальном времени Тихоокеанской магнитометрической сети (MAGDAS/CPMN), управляемой Международным Центром по науке и образованию в области космической погоды Университета Кюсю, Япония (ICSWSE) [Yumoto, 2007]. Использовались данные реального времени, представленные на сайте [<http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/>].

В ходе исследований использовались результаты инструментальных наблюдений за вариациями магнитного поля Земли, выполненных на станции Давао (географические координаты: 7° с.ш., 125.4° в.д.; геомагнитные координаты 2.22 с.ш., 197.9° в.д.) с помощью магнитометрической системы MAGDAS-9 с временным разрешением 1 мин.

Блок MAGDAS-9 [Abe et al., 2013] состоит из магнитного датчика (магнитометра) с 7-метровым кабелем, предварительного усилителя (предусилителя), антенны GPS (система глобального позиционирования) с кабелем, регистратора данных для контроля данных и 70-метрового кабеля. Геомагнитный датчик представляет собой трехкомпонентный феррозонд с кольцевым сердечником, динамическим диапазоном $\pm 70\,000$ нТл/32 бита и разрешением 0.01 нТл. Данные о магнитном поле получаются с частотой дискретизации 16 Гц, а затем усредненные данные передаются в ICSWSE в реальном времени. Данные регистрации представляются в виде следующих магнитных компонент: H (геомагнитное направление на север), D (геомагнитное направление на восток) и Z (вертикально вниз).

Результаты наших предыдущих исследований анализа частотного состава геомагнитных вариаций, зарегистрированных в период сейсмических событий и извержений вулканов, визуально-сопоставительного анализа и оценки вейвлет-когерентности вариаций B_z -компоненты межпланетного магнитного поля и компонент геомагнитного поля [Рябова и др., 2023] показали, что в период высокоэнергетических

событий записи геомагнитных вариаций искажены вариациями магнитного поля, вызванными источниками солнечного происхождения, за исключением восточной горизонтальной компоненты магнитного поля. Такой вывод вполне соответствует данным, полученным при измерениях в низких широтах [Kelley, 1989]. Отметим, что геомагнитное поле на станции Давао приблизительно горизонтально (станция Давао расположена недалеко от магнитного экватора). В настоящей работе при исследовании геомагнитных вариаций в период сильных землетрясений анализируются вариации D (восточно–западной) компоненты магнитного поля.

В качестве основного метода исследования геомагнитных вариаций был выбран вейвлет-анализ, показавший в частности свою эффективность при анализе геомагнитных вариаций [Рябова, Спивак, 2017; Adhikari et al., 2017; Riabova, 2022]. Вейвлет-анализ позволяет выявить временные свойства изучаемого сигнала, а также позволяет получить информацию о том, в какой момент времени появились те или иные компоненты сигнала [Mejer, 1993]. В настоящей работе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [Togtense, Compo, 1998], а в качестве базисного вейвлета использовался вейвлет Морле [Grossmann, Morlet, 1984]. При непрерывном вейвлет-преобразовании на границе области (конус влияния) появляются искажения (так называемые “краевые эффекты”), обусловленные тем, что базисная вейвлет-функция не полностью локализована по времени [Togtense, Compo, 1998; Riabova, 2018]. В настоящей работе представление результатов вейвлет-преобразования оформлено в виде скалограмм (локальный спектр энергии) с учетом “краевых” эффектов (конус влияния) [Riabova, 2018].

ГЕОМАГНИТНОЙ ОТКЛИК

Отбор сейсмических событий по геомагнитной обстановке

На первом этапе выполнения настоящих исследований была проанализирована геомагнитная обстановка в период, включающий время основного толчка. В табл. 2 приведены значения трехчасового геомагнитного планетарного Kp -индекса в момент основного толчка и максимальное значение Kp -индекса (Kp_{\max}) за период 9 ч до и 9 ч после землетрясения, а также значение геомагнитного ap -индекса в момент основного толчка и максимальное значение ap -индекса (ap_{\max}) за период 9 ч до и 9 ч после

³⁰ <https://earthquake.phivolcs.dost.gov.ph/>

Таблица 2. Значения геомагнитного Kp -индекса в момент основного толчка и максимальные значения Kp -индекса за 9 ч до и 9 ч после землетрясений, геомагнитного ap -индекса в момент основного толчка и максимальные значения ap -индекса за 9 ч до и 9 ч после землетрясений из списка, представленного в табл. 1

№	Kp	Kp_{\max}	ap	ap_{\max}
1	2 ₀	1+	7	5
2	4+	5+	32	56
3	1+	3–	5	12
4	2+	3–	9	12
5	2+	3–	9	12
6	2+	3–	9	12
7	3–	3–	12	12
8	2–	3 ₀	6	15
9	2 ₀	3 ₀	7	15
10	3–	3–	12	12

землетрясения. Значения планетарных индексов, используемых в настоящей работе, представлены на сайте [https://isgi.unistra.fr/]. Анализ данных табл. 2 показал, что событие 22.11.2023 г. ($Kp \geq 4+$, $Kp_{\max} \geq 5+$) можно исключить из дальнейшего рассмотрения, поскольку запись в период этого землетрясения будет искажена вариациями магнитного поля, вызванными источниками солнечного происхождения.

Результаты выделения геомагнитного отклика

С целью поиска геомагнитных вариаций, связанных с сейсмическими событиями, и получения информации об их частотном составе в настоящей работе выполнялся спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования. Данные настоящей работы свидетельствуют о том, что землетрясения, магнитудой более или равной 6, сопровождались аномальными геомагнитными вариациями. Существенные помехи при анализе временных вариаций геомагнитного поля, сопутствующих конкретному землетрясению, могут вносить также геомагнитные вариации от афтершоков, которые близки по времени к моменту основного толчка рассматриваемого события, но разделение эффектов от них на данном этапе исследований не представлялось возможным.

Данные в виде скалограммы вариаций D (восточно-западной) компоненты геомагнитного поля на станции Давао после основного толчка землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$ 17.11.2023 г., представленные за период ~ 1 ч до и ~ 2 ч после основного толчка (рис. 1), свидетельствуют о сложном составе вызванных геомагнитных вариаций. Как видно из рис. 1, в скалограмме геомагнитных вариаций присутствуют две спектральные гармоники. Первая аномалия с периодом $\sim 2-6.5$ мин появляется спустя ~ 6 мин после основного толчка землетрясения в 16:20 LT (LT = UTC + 8 ч), а примерно через 12 мин в 16:31 LT наблюдается аномалия с периодом $\sim 7-14$ мин. Продолжительность короткопериодной аномалии составляет ~ 15 мин, а длиннопериодной аномалии – ~ 21 мин.

Рассмотрим геомагнитный эффект мощного землетрясения, произошедшего 02.12.2023 г. и его афтершоков, магнитуда которых превышала или была равна 6.

На рис. 2 представлена скалограмма вариаций D (восточно-западной) компоненты геомагнитного поля на станции Давао после основного толчка землетрясения и его трех афтершоков с магнитудой $M_w = 6.4$ (00:03 LT 03.12.2023 г.) $M_w = 6.1$ (1:40 LT 03.12.2023 г.) и $M_w = 6.3$ (2:09 LT 03.12.2023 г.). Как видно из рис. 2, скалограмма геомагнитных вариаций характеризуется

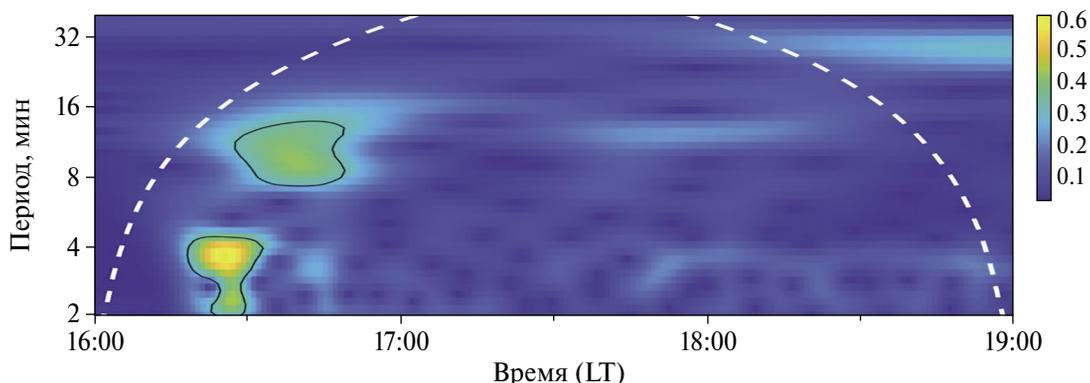


Рис. 1. Скалограмма геомагнитных вариаций (D -компонента) на станции Давао в период основного толчка землетрясения с $M_w = 6.8$, произошедшего 17.11.2023 г.; здесь и далее: белые пунктирные линии – конус влияния.

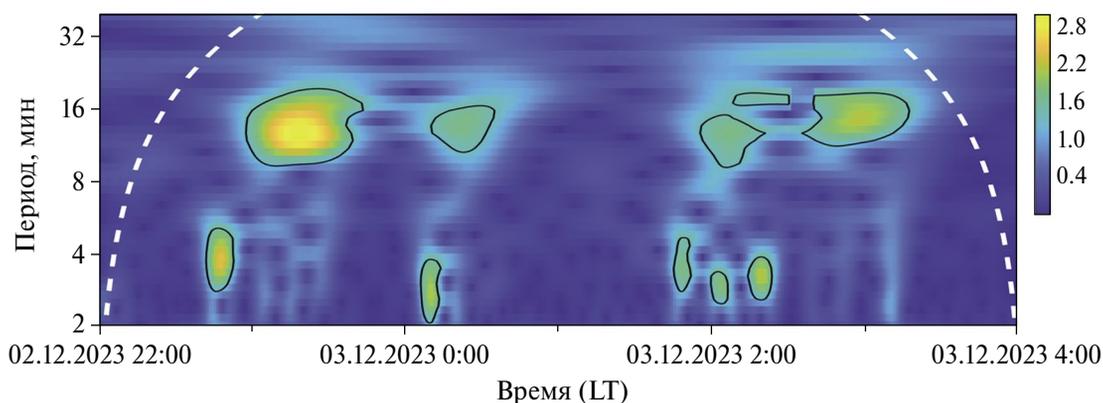


Рис. 2. Скалограмма геомагнитных вариаций (D -компонента) на станции Давао в период основного толчка землетрясения с $M_w = 7.4$, произошедшего 22:37 LT 02.12.2023 г., и трех ближайших по времени сильных афтершоков 03.12.2023 г. с $M_w = 6.4$ (0:03 LT), $M_w = 6.1$ (1:40 LT) и $M_w = 6.3$ (2:09 LT).

рядом спектральных гармоник. Первая аномалия с периодом ~ 3 – 6.5 мин появляется спустя ~ 6 мин после основного толчка в 22:43 LT, а примерно через 19 мин после основного толчка в 22:56 LT наблюдается более длиннопериодная аномалия с периодом ~ 10 – 19 мин. Продолжительность короткопериодной аномалии составляет ~ 14 мин, а длиннопериодной аномалии – ~ 48 мин. Спустя примерно 6 мин после сильного афтершока с $M_w = 6.4$ в 00:09 LT возникают колебания с периодом ~ 2 – 4 мин, а еще через 10 мин после начала первой аномалии в 00:19 LT наблюдаются колебания с периодом ~ 11 – 17 мин. Спустя примерно 6 мин после сильного афтершока с $M_w = 6.1$ в 1:46 LT возникают колебания с периодом ~ 3.5 – 5 мин, а еще через 10 мин после начала первой аномалии в 1:56 LT наблюдаются колебания с периодом ~ 9 – 16 мин. Спустя примерно 7 мин после сильного афтершока с $M_w = 6.3$ в 2:16 LT возникают колебания с периодом ~ 3 – 4 мин, а еще через 10 мин после

начала первой аномалии в 2:30 LT наблюдаются колебания с периодом ~ 10 – 19 мин. Продолжительность короткопериодной аномалии после афтершока с $M_w = 6.4$ составляет ~ 9 мин, после афтершока с $M_w = 6.1$ составляет ~ 8 мин, после афтершока с $M_w = 6.3$ составляет ~ 10 мин, а длительности длиннопериодных аномалий после этих афтершоков равны ~ 24 мин, ~ 28 мин и ~ 40 мин соответственно. В скалограмме, представленной на рис. 2, присутствуют еще две аномалии с периодами ~ 2.5 – 3.5 мин и ~ 16 – 18 мин, возникающие примерно через 7 мин (2:02 LT) и 21 мин (2:16 LT) после афтершока с $M_w = 5.9$ (03.12.2023 г., 1:55 LT, 8,64 с.ш., 126,97 в.д., 76 км севернее города Хинатуана в провинции Суригао-дель-Сур, 251 км).

Кроме анализа геомагнитного эффекта ближайших трех афтершоков (магнитуда больше или равна 6) землетрясения, произошедшего 2 декабря, в настоящей работе были рассмотрены геомагнитные записи за 1 ч до и 2 ч после еще нескольких сильных афтершоков,

произошедших 3 декабря: афтершоки магнитудами 6 (4:52 LT), 6.6 (18:35 LT) и 6 (22:35 LT). Как видно из скалограмм, представленных на рис. 3, наблюдается практически однотипная картина аномалий. В геомагнитных вариациях на станции Давао возникают аномалии через ~6–7 мин после подземных толчков афтершоков и имеют периоды ~2.5–4 мин. Продолжительность аномалий составляет ~9–10 мин. После всех афтершоков возникают и длиннопериодные аномалии с периодами ~10–23 мин, продолжительность этих аномалий ~25–36 мин.

На рис. 4 представлена скалограмма вариаций *D*-компоненты геомагнитного поля на станции Давао после основного толчка землетрясения

магнитудой 6.8, произошедшего 04.12.2023 г. (PHIVOLCS выделил это событие как отдельное землетрясение). Как видно из рис. 4, картина аномалий похожа на картину аномалий землетрясения такой же магнитуды, произошедшего 17.11.2023 г. (см. рис. 1). Первая аномалия с периодом ~2–7.5 мин появляется спустя ~7 мин после основного толчка в 03:56 LT, а примерно через 22 мин после основного толчка в 04:11 LT наблюдается более длиннопериодная аномалия с периодом ~13–22 мин. Продолжительность короткопериодной аномалии составляет ~14 мин, а длиннопериодной аномалии – 36 мин.

Параметры геомагнитного эффекта всех рассмотренных событий (расстояние от эпицентра

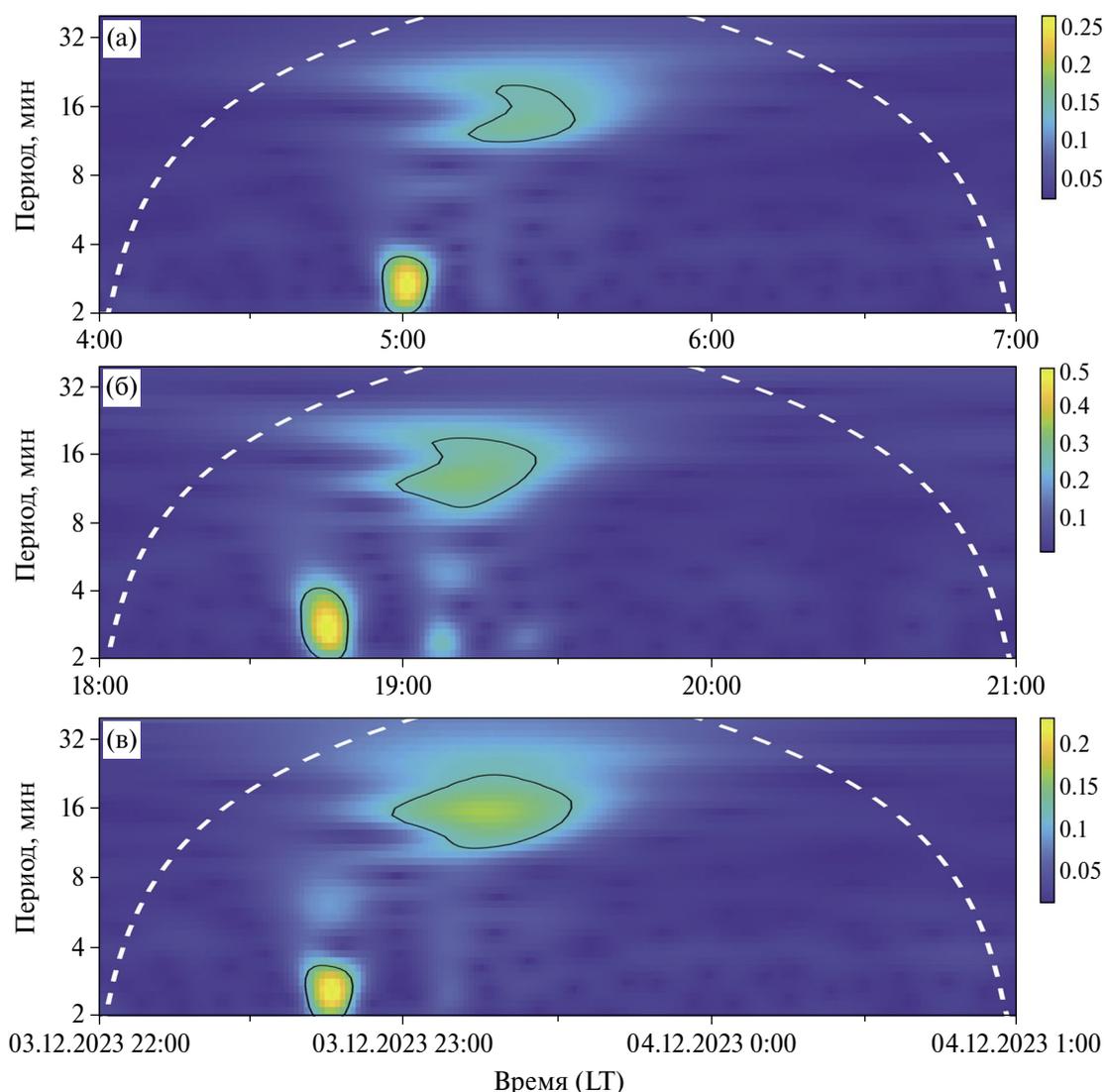


Рис. 3. Скалограммы геомагнитных вариаций (*D*-компонента) на станции Давао в период сильных афтершоков 03.12.2023 г. после мощного землетрясения с $M_w = 7.4$, произошедшего 02.12.2023 г.: (а) афтершок с $M_w = 6$ (4:52 LT); (б) афтершок $M_w = 6.6$ (18:35 LT); (в) афтершок $M_w = 6$ (22:35 LT).

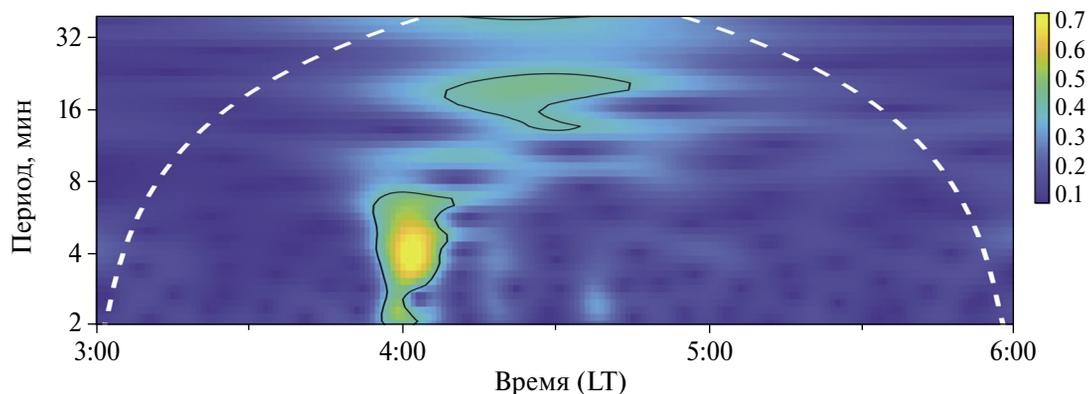


Рис. 4. Скалограмма геомагнитных вариаций (D -компонента) на станции Давао в период основного толчка землетрясения с $M_w = 6.8$, произошедшего 04.12.2023 г. в 03:49 LT.

землетрясения до станции Давао, рассчитанное методом гаверсинов, время начала возмущения, диапазон его периодов и продолжительность возмущения) представлены в табл. 3 и табл. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Приведенные в предыдущем разделе результаты позволяют сделать вывод о том, что геомагнитный отклик, регистрируемый наземными магнитометрами после достаточно сильных сейсмических событий (в данном случае — это землетрясения в районе Филиппинских островов), состоит из короткопериодных и длиннопериодных вариаций. При этом можно определить, что

они обусловлены волнами, генерируемыми непосредственно землетрясением: сейсмическими волнами Релея и атмосферными внутренними волнами соответственно. Это заключение основано на свойствах волн и известных расстояниях от эпицентров событий до станции наблюдения. Напомним, что регистрируемые наземными магнитометрами вариации обусловлены возмущением токовых систем нижней ионосферы (на высоте около 100 км).

Действительно, зная скорости волн Релея ~ 3 км/с и расстояния эпицентров событий до станции Давао (второй столбец табл. 3), нетрудно определить время распространения волны до станции и, с учетом распространения до ионосферы акустического сигнала,

Таблица 3. Параметры короткопериодных геомагнитных аномалий после землетрясений из списка, представленного в табл. 1 (указано тихоокеанское время (UTC+8 ч))

№	Расстояние, км	Период, мин	Время начала возмущения	Продолжительность возмущения, мин
1	181	2–6.5	16:20	15
3	207	3–6.5	22:43	14
4	239	2–4	00:09	9
5	229	3.5–5	01:46	8
6	280	3–4	02:16	10
7	245	2–3.5	04:58	9
8	238	2–4	18:41	9
9	300	2–3.5	22:42	10
10	274	2–7.5	03:56	14

Таблица 4. Параметры длиннопериодных геомагнитных аномалий после землетрясений из списка, представленного в табл. 1 (указано тихоокеанское время (UTC+8 ч))

№	Расстояние, км	Период, мин	Время начала возмущения	Продолжительность возмущения, мин
1	181	7–14	16:31	21
3	207	10–19	22:56	48
4	239	11–17	0:19	24
5	229	9–16	01:56	28
6	280	10–19	02:30	40
7	245	11–20	05:11	25
8	238	10–19	18:56	27
9	300	10–23	22:59	36
10	274	13–22	04:11	36

генерируемого волной Релея, получить время начала регистрации возмущения (четвертый столбец табл. 3). Заметим, что периоды волн (третий столбец табл. 3) вполне соответствуют акустическому диапазону атмосферных волн, который в данном случае назван короткопериодным.

Длиннопериодные вариации соответствуют диапазону атмосферных внутренних гравитационных волн – ВГВ (третий столбец табл. 4). Оценить основной период колебаний T можно по известной формуле $T = T_g L / h$ [Госсард, Хук, 1978], где T_g – период Брента–Вяйсяля; L , h – расстояние от источника до пункта наблюдения (второй столбец табл. 4) и высота регистрации сигнала соответственно. Зная расстояния эпицентров событий до станции Давао (второй столбец табл. 4) и время начала регистрации возмущения от момента землетрясения (четвертый столбец табл. 4 и четвертый столбец табл. 1 соответственно) можно оценить скорость распространения длиннопериодных возмущений, которая оказывается в диапазоне 200–300 м/с. Такие скорости характерны для ВГВ.

Устойчивая картина появления ионосферных возмущений от события к событию с различными магнитудами, а также естественная интерпретация этих возмущений в терминах волн Релея и акустико-гравитационных волн (АГВ) позволяет исключить предположение о случайном совпадении времени наблюдения и периодов

возмущений со скоростями и периодами волн Релея и АГВ.

Далее, проведенный с использованием наземного магнитометра на станции Давао анализ ионосферных откликов на землетрясения с магнитудой меньше 6.5 показал, что сама возможность их регистрации позволяет надеяться на снижение порога (по сравнению с тем, что установлен посредством ГНСС-радиопросвечивания для землетрясений [Perevalova et al., 2014]) энергии импульсных литосферных источников (включая взрывы, вулканические эксплозии), отклик на которые еще может быть зарегистрирован в ионосфере.

Подчеркнем, что вывод о пороговой магнитуде $M_w = 6.5$ для землетрясений относился к методу ГНСС-радиопросвечивания, который является интегральным. Между тем, ионосферный отклик на импульсные источники (включая землетрясения) может быть зарегистрирован посредством ионосферного или доплеровского зондирования (см., например, [Гохберг, Шалимов, 2008]), а также использованного в настоящей работе наземного магнитометра. Иными словами, при использовании других инструментов наблюдения пороговая магнитуда события не обязана быть выше 6.5 для того, чтобы ионосферный отклик наблюдался, что и продемонстрировано в настоящей работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”, интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир. 1978. 532 с.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 296 с.
- Падохин А.М., Шалимов С.Л. О возможности детектирования ионосферных возмущений, вызванных мощными подземными взрывами, методами GNSS-радиопросвечивания // Журнал Радиоэлектроники. 2023. № 12. DOI:10.30898/1684-1719.2023.12.15
- Рябова С.А., Ольшанская Е.В., Шалимов С.Л. Отклик нижней и верхней ионосферы на землетрясения в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 153–162. DOI:10.31857/S0002333723060182
- Рябова С.А., Спивак А.А. Особенности геомагнитных вариаций на средних широтах восточно-европейской платформы // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 2. С. 217–225. DOI:10.7868/S0016794017020122
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли и приуроченных к сильным землетрясениям // Физика Земли. 2022. № 4. С. 30–45. DOI: 10.31857/S0002333722040081
- Соловьева М.С., Падохин А.М., Шалимов С.Л. Мегаизвержение вулкана Хунга 15 января 2022 г.: регистрация ионосферных возмущений посредством СДВ и ГНСС радиопросвечивания // Письма ЖЭТФ. 2022. Т. 116. № 11. С. 816–822. DOI:10.31857/S1234567822230124
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Соловьев С.П., Харламов В.А. Акустический, магнитный и электрические эффекты извержения вулкана Стромболи (Италия) в июле–августе 2019 г. // Физика Земли. 2020. № 5. С. 117–130. DOI:10.31857/S0002333720050129
- Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019а. № 6. С. 3–12. DOI:10.31857/S0002-3337201963-12
- Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитный эффект землетрясений // Докл. РАН. 2019б. Т. 488. № 2. С. 197–201. DOI:10.31857/S0869-56524882
- Спивак А.А., Рябова С.А. Магнитный и электрические эффекты эксплозивной стадии извержения вулкана Стромболи (03.07.2019 г., Италия) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 54–57. DOI:10.31857/S2686739720070191
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 199–213.
- Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Перевалова Н.П., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: ИГУ. 2013. 160 с.
- Abe S., Kiyohumi Yumoto K., Ikeda A., Uozumi T., Maeda G. Data and information activities of ICSWSE, Kyushu University, Japan // Data Science Journal. 2013. V. 12. <https://doi.org/10.2481/dsj.WDS-014>
- Adhikari B., Khatiwada R., Chapagain N.P. Analysis of geomagnetic storms using wavelet transforms // Journal of Nepal Physical Society. 2017. V. 4. № 1. P. 119–124.
- Grossmann A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1984. V. 15. № 4. P. 723–736.
- Kelley M.C. The Earth’s ionosphere: Plasma physics and electrodynamics. San Diego, California: Academic Press, Inc. 1989. 487 p.
- Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. 1993. 134 p.
- Ozeki M., Heki K. Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2010. V. 115. № A9. DOI:10.1029/2010JA015531
- Park J., Grejner-Grzezinska D.A., von Frese R.R.B., Morton Y. GPS discrimination of traveling ionospheric disturbances from underground nuclear explosions and earthquakes // Navigation – Journal of The Institute of Navigation. 2014. V. 61. № 2. P. 125–134. DOI:10.1002/navi.56
- Peravalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva A.S. Threshold magnitude for Ionospheric TEC response to earthquakes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. V. 108. № 4. P. 77–90. DOI:10.1016/j.jastp.2013.12.014
- Qin Y.S., Yin H. Western Pacific, The strategic priority in China Deep-Sea research // Advances in Earth Science. 2011. V. 26. № 3. P. 245–248.
- Riabova S. Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations // Journal of Physics Conference Series. 2018. V. 1141. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012146
- Riabova S.A. Study of the multifractality of geomagnetic variations at the Belsk Observatory // Doklady Earth Sciences. 2022. V. 507. № 2. P. 299–303. DOI: 10.1134/S1028334X22700489
- Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 605–618.
- Yumoto K. MAGDAS Group (2007) Space weather activities at SERC for IHY: MAGDAS // Bulletin of the Astronomical Society of India. 2007. V. 35. № 4. P. 511–522.
- Zhang T., Li P., Shang L., Cong J., Li X., Yao Y., Zhang Y. Identification and evolution of tectonic units in the Philippine Sea Plate // China Geology. 2022. V. 5. P. 96–109. DOI:10.31035/cg2022003

Ionospheric Response of Earthquakes in the Philippines from November to December 2023

S. A. Riabova^{a,b,*} and S. L. Shalimov^b

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: ryabovasa@mail.ru*

Received February 1, 2024

revised February 17, 2024

accepted February 18, 2024

Abstract – Ground-based magnetometric measurements were used to study ionospheric disturbances observed from November to December 2023 after a series of fairly strong earthquakes in an area of intense seismic activity in the Philippines. It is shown that a stable pattern of the appearance of magnetic disturbances from events with different magnitudes (from $M_w = 6$ to $M_w = 7.4$) is observed, containing short- and long-period disturbances caused by variations in the current systems of the lower ionosphere. It has been established that these variations belong to different branches of atmospheric acoustic-gravity waves: acoustic and internal, respectively. It is shown that the origin of disturbances in the acoustic range may be associated with the arrival of seismic Rayleigh waves, which are a source of acoustic vibrations, while the estimated velocities of atmospheric internal waves correspond to their generation directly at the epicenters of events. Magnetometric measurements have made it possible to record ionospheric disturbances from events with a significantly lower magnitude compared to the radio sounding method using global navigation satellite systems.

Keywords: earthquake, geomagnetic field, wavelet analysis, seismic Rayleigh wave, atmospheric internal wave