

УДК 551.510.53+550.38+551.21

## О ГЕОМАГНИТНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ ВАРИАЦИЯХ ПОСЛЕ СИЛЬНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 2023 г.

© 2024 г. С. А. Рябова<sup>1,2, \*</sup>, С. Л. Шалимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 24.01.2024 г.

Принята в печать 25.01.2024 г.

Наземные магнитометры и станции вертикального зондирования ионосферы использованы для регистрации специфических вариаций геомагнитного поля, обусловленных возмущением токовых систем нижней ионосферы, и электронной концентрации верхней ионосферы после сильного вулканического извержения на Камчатке (Россия) 10.04.2023 г. Анализ результатов измерений двух серий эксплозий показал, что воздействие на нижнюю ионосферу осуществляется как посредством сейсмических волн Релея (являющихся источником акустических волн, распространяющихся в ионосферу), так и атмосферных внутренних гравитационных волн, генерируемых эксплозиями. На расстояниях от источника до тысячи километров обнаружена повторяемость картины ионосферных возмущений после каждой из шести вулканических эксплозий. На больших расстояниях в ионосфере четко регистрируются сигналы от акустических волн, обусловленных волнами Релея, а выделение сигналов от атмосферных внутренних волн затруднено из-за влияния возмущений от других внешних источников.

*Ключевые слова:* эксплозия, сейсмическая волна Релея, геомагнитное поле, критическая частота F2-слоя ионосферы, вейвлет-анализ, акустико-гравитационные волны.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002333724040089>, **EDN:** FWMEVW

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования воздействия наземных источников высокой энергии, таких как землетрясения, вулканы, тайфуны, цунами, на среду обитания человека, а также внешние геосферы необходимы для определения механизмов этих воздействий с целью минимизации негативных последствий таких воздействий. Во внешних геосферах, таких как атмосфера и ионосфера, реакция на упомянутые источники в настоящее время изучается, в основном, с помощью различных спутниковых систем. Так, по измерениям вариаций полного электронного содержания (ПЭС) (см., например, работы [Куницын и др., 2011; Dautermann et al., 2009]) определяется отклик ионосферы на высокоэнергетические литосферные источники. Между тем, традиционное вертикальное зондирование ионосферы с помощью наземных ионозондов также остается достаточно информативным инструментом исследования. Например, авторы работы [Martyama et al., 2012] изучали реакцию

ионосферы после 43 землетрясений  $M \geq 8$  с использованием ионограмм станций вертикального зондирования и обнаружили необычные ионограммы (по-видимому, связанные с приходом сейсмических волн Рэлея) для 8 событий из 43. При этом станции с аномальными ионограммами располагались на расстоянии до 6000 км от эпицентра. Следует отметить, что по мере удаления от эпицентра возрастает вероятность вмешательства внешних факторов, которые также могут стать причиной аномальных сигналов. Одним из основных таких факторов являются геомагнитные возмущения, на фоне которых обычно пытаются найти отклик ионосферы на сейсмические события. Поэтому необходимы специальные исследования, чтобы разделить вклады от разных источников. Это замечание касается не только верхней, но и нижней ионосферы, вариации токов в которой часто изучают с помощью магнитометров [Куницын, Шалимов, 2011; Рябова, Шалимов, 2022;

Рябова и др., 2023; Спивак, Рябова, 2020; Спивак и др., 2020; Черногор, 2019; Нао et al., 2013].

В нашей работе с помощью наземных магнитометров и станций вертикального зондирования ионосферы мы анализируем и интерпретируем специфические вариации геомагнитного поля, а также критической частоты слоя F2 ионосферы, приуроченные к сильному вулканическому извержению на Камчатке (Россия) 10.04.2023 г. Особое внимание уделено влиянию геомагнитной возмущенности на регистрацию и происхождение сигналов.

### АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 10.04.2023 г.

Вулкан Шивелуч ( $56.65^{\circ}$  N  $161.36^{\circ}$  E), один из крупнейших современных андезитовых вулканов Камчатки, расположен на пересечении Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, на расстоянии 50 км от поселка Ключи Усть-Камчатского района и 450 км от г. Петропавловск-Камчатский [<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Sheveluch>]. Вулканический массив Шивелуч, занимающий площадь более 1000 км<sup>2</sup> в северной части Центрально-Камчатской депрессии, можно подразделить на Старый Шивелуч, Байдарный отрог, Молодой Шивелуч [Горбач, Портнягин, 2011; Ozerov et al., 2020].

Современная активность вулкана, связанная с эруптивным центром Молодой Шивелуч, характеризуется чередованием мощных плинианских извержений, слабых выбросов пеплово-газовых облаков и эпизодов активного роста экстрезивного купола [Гирина, 2006; Shevchenko, 2015]. Масштабы и частота этих извержений делают этот вулкан наиболее активным эксплозивным центром Камчатки [Жаринов и др., 2022].

Самое сильное с 1964 г. извержение вулкана Шивелуч (пелейского типа с индексом эксплозивности VEI-5) произошло 10.04.2023 г. Следует отметить, что поступательный рост активности вулкана Шивелуч наблюдался с 28 марта в виде постоянного выброса горячей лавы на вершину купола, продолжающейся его экструзии, фумарольной активности и пепловых выбросов, с 30 марта по 6 апреля на спутниковых снимках была обнаружена термальная аномалия [<https://volcano.si.edu/showreport.cfm?wvar=GVP.WVAR20230405-300270>].

Согласно данным Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВС ДВО РАН) вулкан значительно активизировался в  $\sim 00:54$  LT

11.04.2023 г. ( $\sim 12:54$  UT 10.04.2023 г.) [<https://iz.ru/1496490/2023-04-11/na-kamchatke-slyshny-raskaty-ot-izverzheniia-vulkana-shiveluch>]. По сейсмическим данным Камчатской вулканической станции 10.04.2023 г. с 12:54 до 21:10 UT регистрировались сейсмические события, сопровождавшие пароксизмальную фазу извержения вулкана [<http://volkstat.ru/>]. На снимке со спутника Himawari-9 в 13:20 UT было обнаружено пепловое облако высотой 10 км над уровнем моря и размером  $35 \times 20$  км, дальняя кромка которого находилась на северо-востоке (азимут  $15^{\circ}$ ) от вулкана [[http://d33.infospace.ru/jr\\_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm](http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm)]. Эруптивное облако развернулось и стало перемещаться на запад–северо-запад от вулкана. Наряду с непрерывным выносом пепла из кратера вулкана и образованием расширяющегося эруптивного облака, время от времени происходили мощные эксплозии. По сейсмическим данным Камчатской вулканической станции и спутника Himawari-9 [<https://satelliteliaisonblog.com/2023/04/12/april-10-volcanic-eruption-in-russia/>] значительные импульсы активности произошли примерно в 14:00 (площадь облака 110 км<sup>2</sup>) и 15:20 UT (площадь облака 826 км<sup>2</sup>).

В 17:44 UT извержение вулкана достигло пика пароксизмальной стадии, на вулкане был зафиксирован пепловый выброс (площадь облака 975 км<sup>2</sup>), высота которого составила до 20 км над уровнем моря. Большое облако пепла протянулось на 340 км к северо–северо-западу и на 240 км к западу–юго-западу от вулкана. В близлежащих населенных пунктах Усть-Камчатского района (Ключи, Майское и Козыревск) начались пеплопады. В 18:46 и 19:14 UT произошли очередные мощные эксплозии пепла, высота которых, согласно спутниковым данным Himawari-9 [[http://d33.infospace.ru/jr\\_d33/materials/2023v20n2/283-291/1681247449.webm](http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1681247449.webm); <https://satelliteliaisonblog.com/2023/04/12/april-10-volcanic-eruption-in-russia/>] и “Арктика-М” № 1 [[http://d33.infospace.ru/jr\\_d33/materials/2023v20n2/283-291/1682090840.webm](http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1682090840.webm)] и по сейсмическим данным Камчатской вулканической станции [<http://volkstat.ru/>] превысила 13–19 км над уровнем моря. В 19:29 UT вулкану Шивелуч присвоен наивысший (красный) код авиационной опасности.

В течение всего извержения мощный циклон, во власти которого находился весь полуостров Камчатка, вытягивал эруптивное облако на запад, поворачивал его на юг, растягивал на север

и направлял на восток от вулкана [Гирина и др., 2023; Малкин и др., 2023].

Эксплозивные события сопровождались выносом большого количества диоксида серы (SO<sub>2</sub>). На картах, построенных по данным приборов IASI KA MetOp-B и CriS KA NOAA-20, в районе распространения пеплового облака наблюдалось повышенное содержание диоксида серы (SO<sub>2</sub>) [<https://www.meteorf.gov.ru/press/news/32412/>]. В частности, по спутниковым снимкам, полученным в 1:43 UT 11.04.2023 г., было определено в шлейфе содержание диоксида серы около 0.2 Мт.

Анализ радиолокационных изображений со спутников от 15 апреля показал, что основное извержение произошло в результате обрушения лавового купола вулкана в южном направлении и образования на его месте кальдеры размером 2×2.6 км. Первоначально процесс обрушения был вызван прорывом купола в его основании и последовавшим за ним извержением в юго-восточном направлении [<https://www.volcanodiscovery.com/shiveluch/news/209281/Shiveluch-volcano-Kamchatka-dramatic-morphological-changes-to-dome-area.html>].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

При анализе последствий рассматриваемых вулканических событий привлекались данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, выполненных в ряде “активных” на период извержения вулкана обсерваторий международной сети INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/index-eng.php>] (таблица). Использовались цифровые ряды данных с одноминутной дискретизацией.

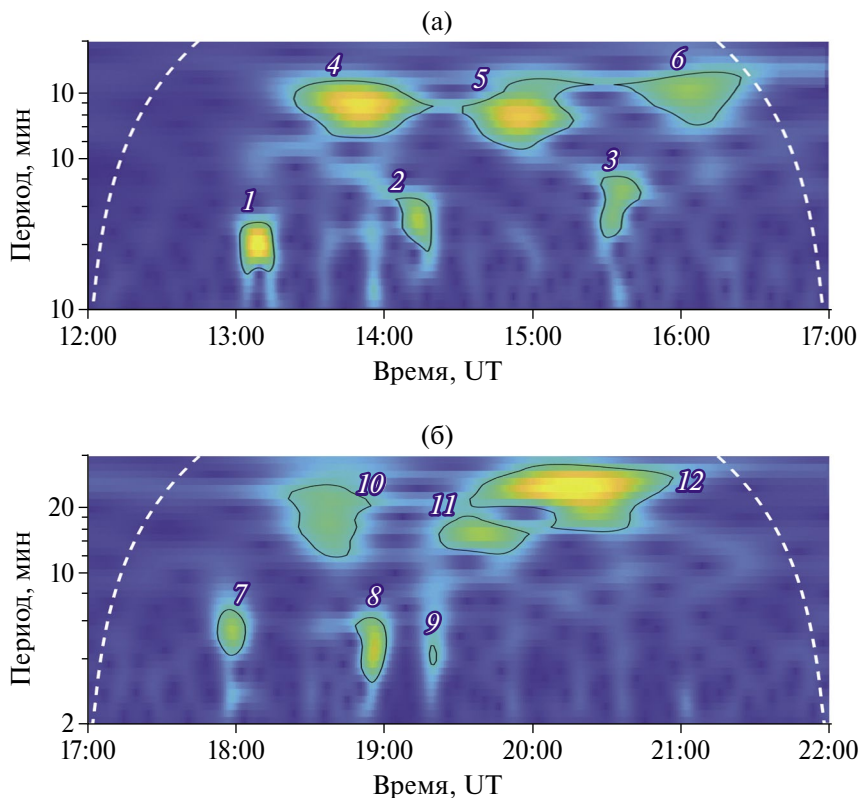
При анализе влияния вулканических извержений на ионосферу в настоящей работе привлекались в виде ионограмм результаты высотно-частотного зондирования на японской станции мониторинга ионосферы Вакканай (45.16° с.ш.; 141.75° в.д., 1865 км от вулкана Шивелуч), размещенные в свободном доступе на сайте Японского национального института информационных и коммуникационных технологий [<https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>]. Кроме того, использовались данные, полученные на ионосферной станции Эрексон, расположенной на острове Шемья (52.73° с.ш.; 185.92° в.д., 1628 км от вулкана Шивелуч).

При выполнении настоящих исследований нами выполнялось определение критической частоты  $f_0F2$  путем ручной обработки ионограмм с интерпретацией по методике URSI [Руководство ..., 1977]. Следует отметить, что при автоматическом определении параметров ионосферы по ионограммам могут возникать ошибки, причем, что касается критической частоты F2-слоя, то в ряде исследований (см., например, работу [Jiang et al., 2013]) продемонстрировано, что неточность в определении значений может достигать 1–5 МГц. В результате ручной обработки формировались цифровые ряды данных временной вариации критической частоты F2-слоя  $f_0F2$  с дискретизацией 15 мин для ст. Вакканай и цифровой ряд данных временной вариации критической частоты F2-слоя  $f_0F2$  с дискретизацией 7.5 мин для ст. Эрексон.

На первом этапе выполнения настоящих исследований была проанализирована сейсмическая активность (землетрясения) и геомагнитная обстановка в период, включающий время извержения вулкана Шивелуч.

Пункты геомагнитных наблюдений

Название	Код	Координаты		Расстояние до вулкана Шивелуч, км
		Широта, град.	Долгота, град.	
Магадан	MGD	60.051 с.ш.	150.728 в.д.	725
Мемамбецу	MMB	43.91 с.ш.	144.19 в.д.	1859
Паратунка	PET	52.97 с.ш.	158.25 в.д.	455
Хабаровск	KHB	47.61 с.ш.	134.69 в.д.	2061
Шмидт	CPS	68.878 с.ш.	179.37 з.д.	1660
Шумагин	SHU	55.35 с.ш.	199.54 в.д.	2347



**Рис. 1.** Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Паратунка в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 по 17:00 UT 10.04.2023 г. (а) и с 17:00 UT по 22:00 10.04.2023 г. (б); здесь и далее: белые пунктирные линии – конус влияния, номера аномалий приведены в поле рисунков.

Анализ данных каталога землетрясений Геологической службы США [<https://www.earthquake.usgs.gov>] показал, что в период с 00:00 UT 10.04.2023 г. по 01:00 UT 11.04.2023 г. не было зарегистрировано ни одного землетрясения магнитудой  $\geq 6.0$ . Наблюдалось всего два землетрясения магнитудой  $> 5.2$  и шесть магнитудой  $\geq 5.0$  и  $< 5.5$ . Все события зарегистрированы на значительном расстоянии от вулкана Шивелуч и пунктов наблюдений (более 6000 км). Непосредственно вблизи вулкана (482 км) было зарегистрировано землетрясение магнитудой 4.0. Удаленные и достаточно слабые землетрясения не могут вызывать значительные вариации в магнитном поле Земли и в полном электронном содержании. В используемых нами данных отклик на землетрясения также не отражался.

Анализ временных вариаций планетарных индексов  $K_p$  и  $a_p$  [<http://www.isgi.unistra.fr>] и локального (Паратунка) индекса  $K(PEF)$  [<http://www.ikir.ru>] показал, что в период до и после извержений вулкана 10.04.2023 г. магнитное поле было умеренно возмущено ( $K_p = 3+$ ,  $a_p = 18$  нТл,  $K(PEF) = 3$ ). Кроме того, был проведен сравнительный анализ вариаций  $B_z$ -компоненты

межпланетного магнитного поля [<https://www.swpc.noaa.gov/products/>] и компонент магнитного поля, зарегистрированных на станциях (табл. 1), расположенных на расстояниях от  $\sim 450$  км (Паратунка) до 2350 км (Шумагин) от места извержения вулкана. В ходе визуально-сопоставительного анализа и оценки вейвлет-когерентности [Grinsted et al., 2004; Maraun, Kurths, 2004] нами было получено, что в период извержения вулкана Шивелуч 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].

В качестве основного метода исследования геомагнитных вариаций и вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы был выбран вейвлет-анализ, показавший, в частности, свою эффективность при анализе геомагнитных вариаций [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 [Meurer, 1993]. В настоящей работе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [Torrence, Compo, 1998], а в качестве базисного вейвлета использовался вейвлет Морле [Grossmann, Morlet, 1984]. Представление результатов вейвлет-преобразования оформлено в виде скалограмм (локальный спектр энергии) с учетом “краевых” эффектов (конус влияния) [Riabova, 2018].

### ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК

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 извержение вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. сопровождалось аномальными геомагнитными вариациями.

Данные в виде скалограмм восточной горизонтальной  $B_y$  составляющей геомагнитного поля на ближайшей ст. Паратунка (455 км от вулкана Шивелуч) после извержений 10.04.2023 г., представленные за период  $\sim 1$  ч до и  $\sim 4$  ч после первого начала вулканической активности (рис. 1а) и за  $\sim 1$  ч до и  $\sim 4$  ч после повторной (более мощной) активизации Шивелуча (рис. 1б), свидетельствуют о сложном характере вызванных геомагнитных вариаций. Как видно из рис. 1, скалограммы геомагнитных вариаций характеризуются рядом спектральных гармоник. Первая аномалия 1 с периодом  $\sim 3$ –5 мин появляется спустя  $\sim 8$  мин после начала активности вулкана, а примерно через 7–8 мин после значительных импульсов активности, произошедших приблизительно

в 14:00 и 15:20 UT, наблюдаются аномалии 2 и 3 с периодами  $\sim 3.5$ –6 мин и  $\sim 4$ –8 мин соответственно. Спустя примерно 40 мин после начала первой активности вулкана Шивелуч возникают колебания 4 с периодом  $\sim 12$ –23 мин. В скалограмме, представленной на рис. 1, присутствуют еще две аномалии 5 и 6 с периодами  $\sim 10$ –24 мин и  $\sim 14$ –25 мин, возникающие примерно через 30–40 мин после значительных импульсов активности, наблюдавшихся примерно в 14:00 и 15:20 UT. После повторной (более мощной) вулканической активности также в скалограмме идентифицируются шесть аномалий. Как видно из рис. 1, аномалия 7 с периодом  $\sim 4$ –7 мин появляется спустя  $\sim 8$  мин после начала повторной активности вулкана Шивелуч, а примерно через 7–8 мин после поверхностных событий примерно в 18:46 и 19:14 UT, возможно сопровождавших пепловые выбросы, наблюдаются аномалии 8 и 9 с периодами  $\sim 3$ –6 мин и  $\sim 3.5$ –4.5 мин соответственно. Спустя примерно 30–40 мин после начала повторной активности вулкана возникают колебания 10 с периодом  $\sim 12$ –26 мин. Кроме того, поверхностные события примерно в 18:46 и 19:14 UT также вызывают аномалии в геомагнитном поле (аномалия 11 с периодом  $\sim 12$ –20 мин и аномалия 12 с периодом  $\sim 15$ –33 мин), которые возникают примерно через 30–40 мин после соответствующего события.

Практически такая же картина наблюдается в скалограмме (рис. 2), вычисленной по данным более удаленной ст. Магадан (725 км от вулкана Шивелуч). В геомагнитных вариациях на ст. Магадан возникают аномалии через  $\sim 9$ –10 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч в 12:54, 14:00, 15:20, 17:44, 18:46, 19:14 UT. Соответствующие аномалии имеют следующие периоды: аномалия 1 –  $\sim 3.5$ –6 мин, аномалия 2 – 2.5–4.5 мин, аномалия 3 –  $\sim 3.5$ –6 мин,

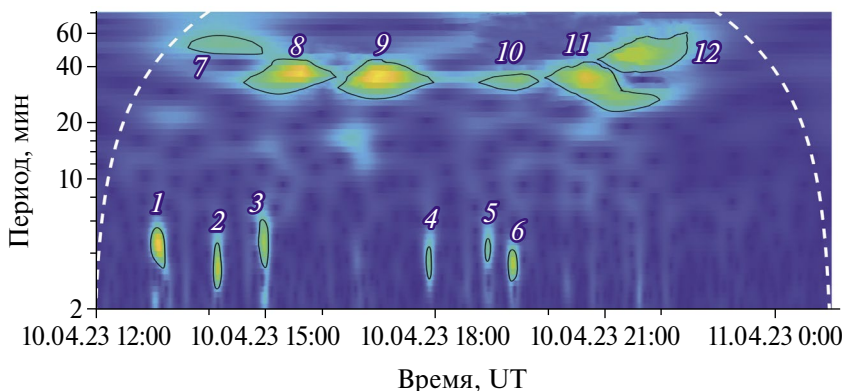


Рис. 2. Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Магадан в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT 10.04.2023 г. по 1:00 UT 11.04.2023 г.

аномалия 4 – ~3–5 мин, аномалия 5 – ~3.5–5 мин, аномалия 6 – ~3–4 мин. Также в скалограмме, представленной на рис. 2, присутствуют аномалии, возникающие примерно через 40–50 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. Соответствующие аномалии имеют следующие периоды: аномалия 7 – ~38–50 мин, аномалия 8 – ~27–39 мин, аномалия 9 – ~25–40 мин, аномалия 10 – ~29–37 мин, аномалия 11 – ~20–39 мин, аномалия 12 – ~36–52 мин.

Скалограммы восточной горизонтальной  $B_y$  составляющей геомагнитного поля на ст. Шмидт (1660 км от вулкана Шивелуч) и на ст. Мемамбетцу (1859 км от вулкана Шивелуч), приведенные соответственно на рис. 3 и рис. 4, демонстрируют визуальное совпадение картин аномалий в геомагнитном поле. На обеих станциях выделяются восемь аномалий. В геомагнитных вариациях на ст. Шмидт (рис. 3) возникают аномалии через ~13–15 мин после шести эпизодов

повышенной активности вулкана Шивелуч в 12:54, 14:00, 15:20, 17:44, 18:46, 19:14 UT. Соответствующие аномалии имеют следующие периоды: аномалия 1 – ~4–6 мин, аномалия 2 – ~3–5.5 мин, аномалия 3 – ~4–11 мин, аномалия 4 – ~3–5 мин, аномалия 5 – ~2.5–6.5 мин, аномалия 6 – ~6–8 мин. Возникают также продолжительные низкочастотные вариации: аномалия 7 с периодом ~35–95 мин наблюдается с 14:38 по 17:53 UT 10.04.2023 г., аномалия 8 с периодом ~45–120 мин наблюдается с 19:18 UT 10.04.2023 г. по 1:41 UT 11.04.2023 г. На ст. Мемамбетцу также наблюдались короткопериодные и длиннопериодные колебания после извержения вулкана Шивелуч (рис. 4). Короткопериодные аномалии с периодами ~3–5 мин (1), ~4–5.5 мин (2), ~3–6 мин (3), ~6–10 мин (4), ~9–15 мин (5), ~3.5–7 мин (6) возникают через ~13–15 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч. Длиннопериодная аномалия 7 с периодом ~85–145 мин

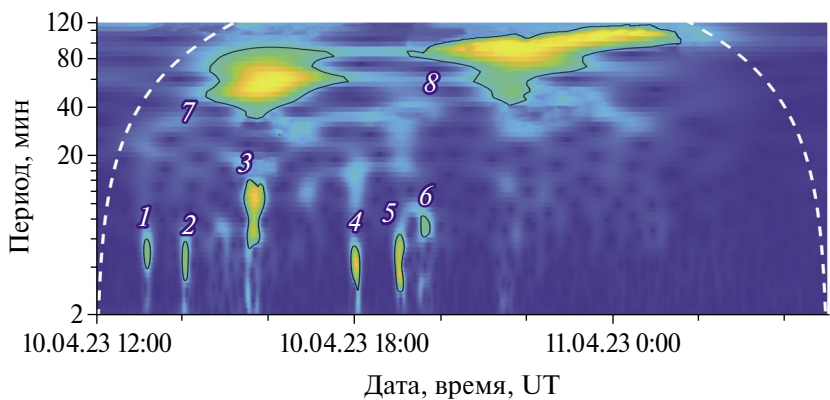


Рис. 3. Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Шмидт в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT 10.04.2023 г. по 5:00 UT 11.04.2023 г.

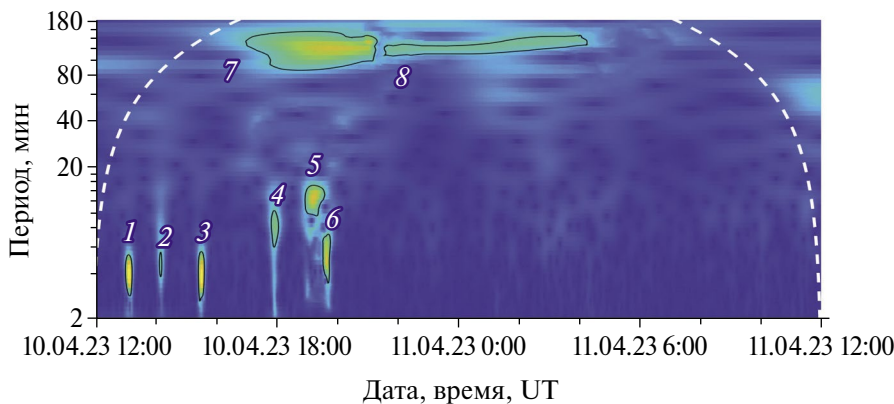


Рис. 4. Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Мемамбетцу в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT 10.04.2023 г. по 12:00 UT 11.04.2023 г.

наблюдается с 14:52 по 17:53 UT 10.04.2023 г., аномалия 8 с периодом ~105–140 мин наблюдается с 20:32 UT 10.04.2023 г. по 4:48 UT 11.04.2023 г.

При выполнении настоящих исследований рассматривается геомагнитный эффект на более удаленных от вулкана Шивелуч станциях: Хабаровск (2061 км) и Шумагин (2347 км). Анализ скалограмм, вычисленных по данным вариаций восточной горизонтальной  $B_y$ , составляющей геомагнитного поля, показал, что на таком расстоянии наблюдаются только короткопериодные геомагнитные аномалии. Скалограммы  $B_y$ , составляющей геомагнитного поля на ст. Хабаровск и на ст. Шумагин после извержений Шивелуч 10.04.2023 г. представлены на рис. 5 и рис. 6 за период ~1 ч до и ~4 ч после первого начала вулканической активности Шивелуча (рис. 5а, 5б) и за ~1 ч до и ~4 ч после повторной (более мощной) активизации вулкана (рис. 6а, 6б). На ст. Хабаровск аномалии возникают через ~16–18 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана и имеют периоды: аномалия 1 – ~3–6.5 мин, аномалия 2 – 2.5–5 мин, аномалия 3 – ~3–7 мин, аномалия 4 – ~3–5 мин, аномалия 5 – ~4–7 мин,

аномалия 6 – ~4–6 мин. На ст. Шумагин аномалии возникают через ~17–19 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана и имеют периоды: аномалия 1 – ~4–7 мин, аномалия 2 – 4.5–10 мин, аномалия 3 – ~5.5–10 мин, аномалия 4 – ~2.5–5.5 мин, аномалия 5 – ~3–6.5 мин, аномалия 6 – ~3–4.5 мин.

### ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

С целью поиска ионосферного отклика на активность вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. были обработаны и проанализированы с помощью спектрального анализа на основе вейвлет-преобразования ионограммы, полученные в ходе высотно-частотного зондирования на станциях Вакканай и Эрексон.

Скалограммы критической частоты  $f_0F2$  на ионосферной станции Эрексон представлены на рис. 7а. Как видно из рис. 7а, примерно в 13:18 UT, т.е. приблизительно через 24 мин после начала вулканической активности Шивелуча наблюдаются аномалии в вариации критической частоты F2-слоя с периодами от менее 15 мин до 20 мин. Следующие активизации

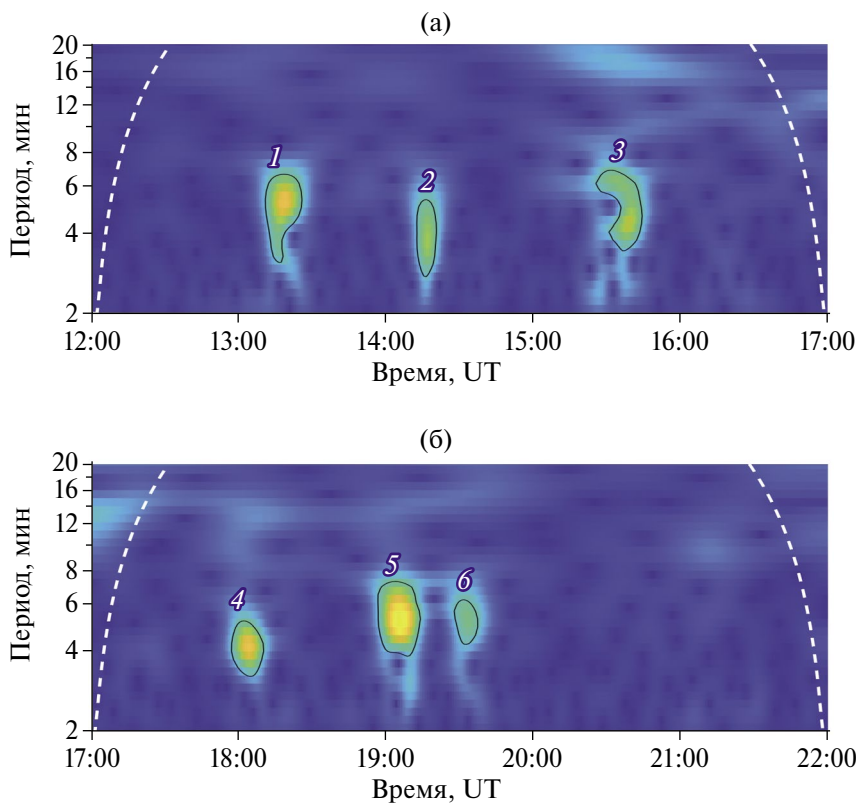
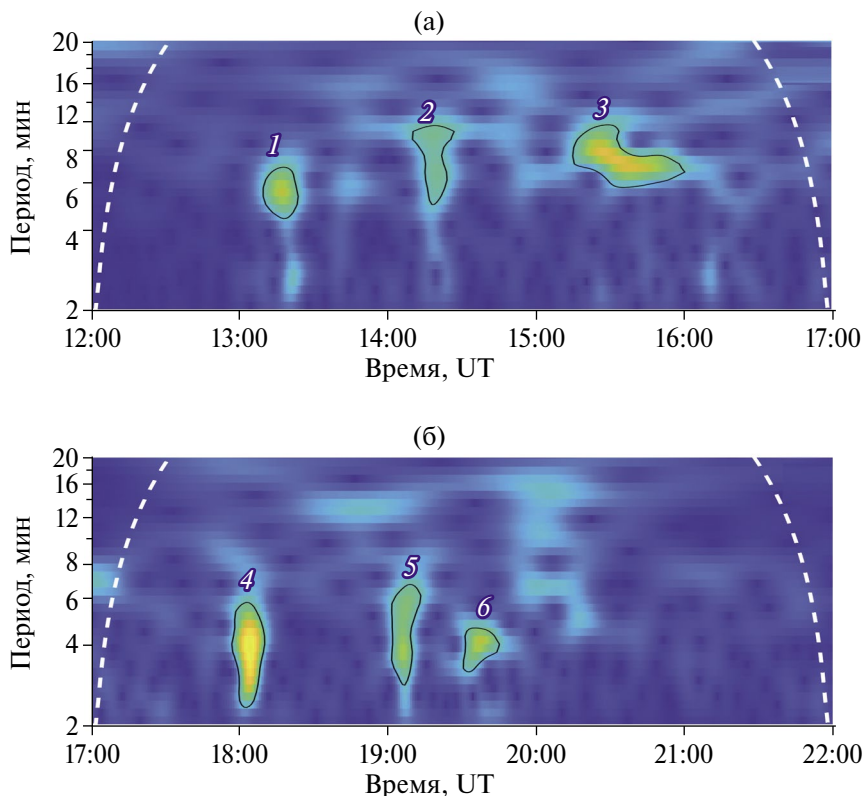


Рис. 5. Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Хабаровск в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 по 17:00 UT 10.04.2023 г. (а) и с 17:00 по 22:00 UT 10.04.2023 г. (б).



**Рис. 6.** Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Шумагин в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 по 17:00 UT 10.04.2023 г. (а) и с 17:00 по 22:00 UT 10.04.2023 г. (б).

вулкана Шивелуч проявляются в скалограмме с теми же периодами, аномалии в вариациях  $f_0F_2$  возникают через  $\sim 24$ – $25$  мин после соответствующего эпизода активности. Только при шестой активизации, которая близка по времени к пятой, невозможно выделить соответствующую аномалию в скалограмме. Примерно через 2 ч после начала активности вулкана Шивелуч (около 15:00 UT) регистрируется аномалия с большим периодом  $\sim 40$ – $70$  мин. Еще одна аномалия с периодом  $\sim 35$ – $95$  мин наблюдается приблизительно в 20:20 UT (примерно через два с половиной часа после повторной активности вулкана Шивелуч).

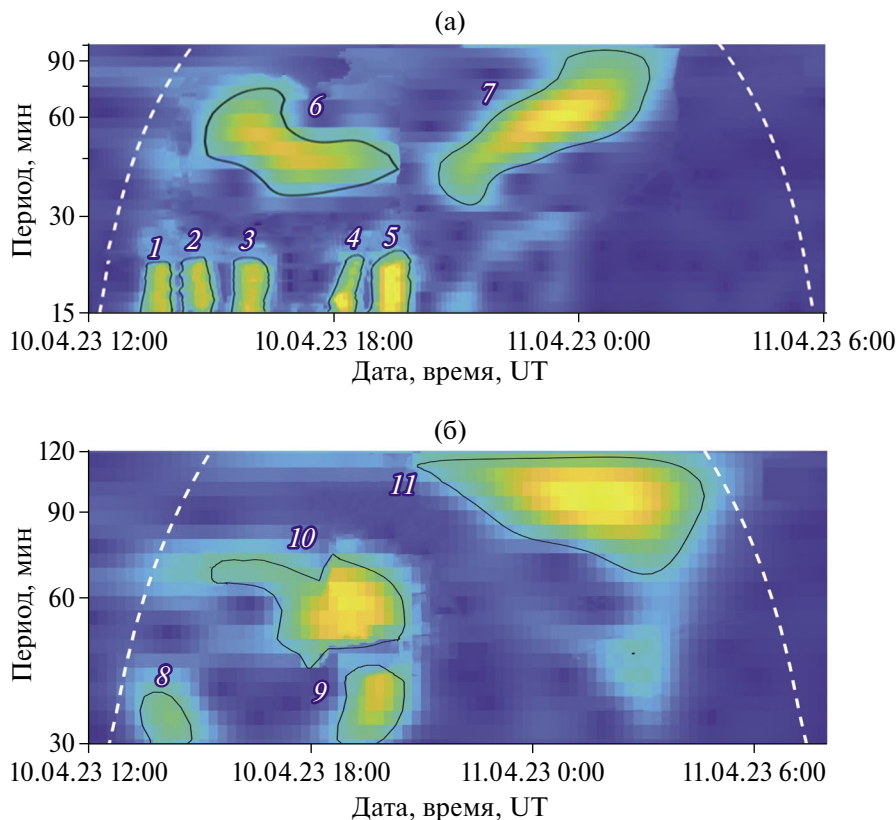
На более удаленной станции Вакканай ситуация с вариациями критической частоты F2-слоя ионосферы несколько проще: наблюдаются четыре аномалии. Данные рис. 76 свидетельствуют о том, что в период приблизительно с 13:20 UT (приблизительно через 26 мин после начала активности вулкана Шивелуч) до 15:00 UT было зарегистрировано возникновение вариации (8) критической частоты F2-слоя ионосферы с периодом  $\sim 30$ – $40$  мин. Повторная активизация также проявляется в скалограмме в 18:20 UT (приблизительно через 26 мин после начала повторной

активности вулкана Шивелуч) вариацией (9) критической частоты F2-слоя ионосферы с периодом  $\sim 30$ – $40$  мин. Возникают также две более длиннопериодные аномалии: 10 с периодом  $\sim 45$ – $75$  мин около 15:00 UT (приблизительно через 2 ч после начала активности вулкана Шивелуч) и 11 с периодом  $\sim 60$ – $120$  мин около 21:00 UT (приблизительно через 3 ч после начала повторной активности вулкана Шивелуч).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Извержения вулканов, сопровождаемые пепловыми выбросами, свидетельствуют об импульсном выделении энергии. В этом случае вулкан можно уподобить точечному импульсному источнику (как и землетрясение или взрыв), в результате действия которого можно ожидать генерации атмосферных акустико-гравитационных волн (АГВ), и рассматривать такое извержение как моделирование точечного литосферного источника. Кроме того, сейсмические события, как известно, являются источником сейсмических поверхностных волн Релея, которые, в свою очередь, способны генерировать акустические волны, распространяющиеся на





**Рис. 7.** Скалограммы вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы по данным зондирования на ст. Эрексон в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT 10.04.2023 г. по 6:00 UT 11.04.2023 г. (а) и на ст. Вакканай в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT 10.04.2023 г. по 8:00 UT 11.04.2023 г. (б).

ионосферные высоты (см., например, [Шалимов, 2018]).

Рассмотрим сначала появление сигналов в нижней ионосфере, отклик на которые может быть зарегистрирован магнитометрами (см., например, работу [Куницын, Шалимов, 2011]), фиксирующими вариации ионосферных токов. Как было отмечено при описании геомагнитных откликов (см. также рис. 1–рис. 6), их можно разделить на две группы: первая группа сигналов после активизации источника регистрируется магнитометрами заметно быстрее второй, причем сигналы первой группы имеют периоды существенно меньше, чем у второй группы. Активизация вулкана имела место в 12:54, 14:00, 15:20, 17:44, 18:46, и 19:14 UT. При этом систематическая регистрация сигналов первой группы в подионосферных точках с периодами в основном в акустическом диапазоне происходила на всех шести рассматриваемых станциях в полном соответствии с предположением о приходе сейсмической волны Релея (скорость волны  $\sim 3$  км/с) на станцию с учетом существенно различных расстояний от источника.

Вторая группа регистрируемых сигналов имеет в основном периоды в диапазоне атмосферных внутренних волн. Эти волны с периодами  $\sim 10$ – $20$  и  $\sim 25$ – $35$  мин появляются через 30–40 и 40–50 мин на ближайших к источнику ст. Паратунка и Магадан соответственно. Источником волн в данном случае могут быть пепловые эксплозии. Этим же волнам соответствуют скорости распространения сигналов в диапазоне 150–300 м/с. Наконец, можно оценить предполагаемые периоды сигналов, если считать их обусловленными внутренними волнами. Действительно, используя для оценок формулу  $T = T_g L / h$ , где:  $T_g$  – период Брента–Вяйсяля;  $L$ ,  $h$  – расстояние от источника и высота регистрации сигнала; и подставляя  $L = 450$  км,  $h = 110$  км, находим  $T \approx 20.5$  мин для сигналов на ст. Паратунка и  $T \approx 33$  мин – на ст. Магадан при  $L = 725$  км, что соответствует периодам, показанным на скалограммах (см. рис. 1 и рис. 2).

На дальних станциях (Шмидт, Мемамбецу, Хабаровск, Шумагин) трудно ожидать прямого распространения ВГВ непосредственно от вулкана в нижнюю ионосферу. Однако на первых

двух из дальних станций были зарегистрированы возмущения ионосферных токов с периодами 40–120 и 80–140 мин соответственно, принадлежащие диапазону ВГВ, которые, как можно оценить, могли распространяться со скоростями 200–300 м/с от вулкана. Применяя приведенную выше оценочную формулу для периода ВГВ, в данном случае нетрудно видеть, что получаемые периоды  $\sim 75$  мин и  $\sim 85$  мин (соответственно для станций Шмидт и Мемамбецу) близки к зарегистрированным. Поэтому можно было бы думать, что ВГВ генерировались непосредственно в моменты активизаций вулкана. Следует, однако, отметить, что над полуостровом Камчатка в это время был активен циклон [Гирина и др., 2023; Малкин и др., 2023], который также мог стать источником этих длиннопериодных возмущений (см., например, работу [Ясюкевич и др., 2013]). Однако разделить вклады вулканических извержений и циклона не представляется возможным.

Наблюдаемые посредством ионосферного зондирования вариации критической частоты слоя F2, как и в случае вариаций токовых систем в нижней ионосфере, можно разделить на две группы: коротко- и длиннопериодные. Отметим, что акустические (короткопериодные) сигналы на высотах верхней ионосферы (вблизи максимума слоя F) имеют характерные периоды в диапазоне 13–15 мин. Поэтому можно считать, что все аномалии в этом спектральном диапазоне (см. рис. 7а) обусловлены приходом сейсмической волны Релея на станцию после соответствующих активизаций вулкана. Как уже отмечено в разделе “Геомагнитный отклик”, зарегистрированные нами сигналы свидетельствуют о приходе сейсмических волн Релея с периодами около 5 мин. Акустические волны, генерируемые волной Релея с такими периодами, на высотах F-слоя ионосферы попадут в диапазон 13–15 мин.

В свою очередь, длиннопериодные аномальные возмущения, наблюдаемые на ст. Эрексон ( $\sim 40$ – $70$  и  $\sim 35$ – $95$  мин) и ст. Вакканай (40–75 и 60–120 мин) могут быть обусловлены ВГВ, генерируемыми вулканом или циклоном (как и в рассмотренном выше случае геомагнитных вариаций).

Наконец, остановимся еще на двух аномальных возмущениях с периодами 30–40 мин, наблюдаемых в вариациях критической частоты слоя F только на ст. Вакканай. В обоих случаях сигналы возникают после эксплозий и приблизительно через 26 мин после них. При этом зарегистрированные возмущения были достаточно

продолжительными по времени (длительностью приблизительно 1 ч). Время их появления соответствует распространению после эксплозий волны Релея, которая генерирует акустические волны. Однако 15-минутный режим зондирования на рассматриваемой станции не позволил выделить приход в ионосферу акустического сигнала (с периодом 13–15 мин на высотах слоя F), так что результат применения вейвлет-анализа показал только 30–40 минутный сигнал.

Таким образом, на основе данных наземных магнитометров и ионосферного зондирования проанализированы возмущения в нижней ионосфере и в области максимума ионосферного F2-слоя в период извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. В качестве характеристик отклика ионосферы на это событие изучены наземные вариации магнитного поля и критической частоты  $f_0F2$  слоя F ионосферы. Анализ результатов измерений показал, что воздействие на ионосферу осуществляется посредством сейсмических волн Релея (являющихся источником акустических волн, распространяющихся в ионосферу) и атмосферных внутренних гравитационных волн, генерируемых вулканической активностью. Этот вывод основан на повторяемости картины ионосферных возмущений после каждой из шести вулканических эксплозий.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”, интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В., Ушаков С.В., Овсянников А.А., Сокоренко А.В. Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16–23.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурждаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291.

- Горбач Н.В., Портнягин М.В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка // *Петрология*. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А.* О продолжении нового эруптивного цикла вулкана Шивелуч в 2001–2021 гг., Камчатка // *Вулканология и сейсмология*. 2022. № 3. С. 3–11.
- Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л.* Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: регистрация ионосферных возмущений по данным GPS // *Письма в ЖЭТФ*. 2011. Т. 94. № 8. С. 657–661.
- Куницын В.Е., Шалимов С.Л.* Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн // *Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия*. 2011. № 5. С. 75–78.
- Малкин Е.И., Чернева В.И., Махлай Д.О., Чернева Н.В., Акбашев Р.Р., Санников Д.В.* Дистанционные методы наблюдений за извержениями вулканов Шивелуч и Безымянный // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2023. Т. 43. № 2. С. 141–165.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / П.В. Медникова (ред.). М.: Наука. 1977. 342 с.
- 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., 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
- 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.* 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
- Черногор Л.Ф.* Геомагнитные возмущения, сопровождавшие великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.
- Шалимов С.Л.* Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН. 2018. 390 с.
- 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.
- 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.
- Dautermann T., Calais E., Mattioli G.S.* Global Positioning System detection and energy estimation of the ionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2009. V. 114. № B02. DOI: 10.1029/2008JB005722
- Grinsted A., Moor J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical timeseries // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004. V. 11. P. 561–566.
- 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.
- Hao Y.Q., Xiao Z., Zhang D.H.* Teleseismic magnetic effects (TMDs) of 2011 Tohoku earthquake // *Journal of Geophysical Research. Space Physics*. 2013. V. 118. № 6. P. 3914–3923. DOI: 10.1002/jgra.50326
- Jiang C., Yang G., Zhao Z., Zhang Y., Zhu P., Sun H.* An automatic scaling technique for obtaining F2 parameters and F1 critical frequency from vertical incidence ionograms // *Radio Science*. 2013. V. 48. P. 739–751.
- Kelley M.C.* The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics. San Diego, California: Academic Press, Inc. 1989. 487 p.
- Maraun D., Kurths J.* Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004. V. 11. P. 505–514.
- Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Ishii M., Nishioka M.* Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // *Journal of Geophysical Research. Space Physics*. 2012. V. 117. №3 A8. DOI: 10.1029/2012JA017952
- Meyer Y.* Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. 1993. 134 p.
- Ozerov A.Yu., Girina O.A., Zharinov N.A., Belousov A.B., Demyanchuk Yu.V.* Eruptions in the northern group of volcanoes, in Kamchatka, during the early 21st century // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020. V. 14. P. 1–17. DOI: 10.1134/S0742046320010054
- 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
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu.* Airborne photogrammetry and geomorphological analysis of the 2001–2012 exogenous dome growth at Molodoy Shiveluch Volcano, Kamchatka // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 304. P. 94–107. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.08.013
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79. P. 605–618.

## On Geomagnetic and Ionospheric Variations after the Strong Eruption of Shiveluch Volcano 2023

S. A. Riabova<sup>a,b, \*</sup> and S. L. Shalimov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

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

Received November 30, 2023

revised January 24, 2024

accepted January 25, 2024

**Abstract** – Ground-based magnetometers and vertical ionospheric sounding stations were used to record specific variations in the geomagnetic field caused by disturbances in the current systems of the lower ionosphere and the electron density of the upper ionosphere after a strong volcanic eruption in Kamchatka (Russia) on April 10, 2023. Analysis of the measurement results of two series of explosions showed that the impact on the lower ionosphere is carried out through both seismic Rayleigh waves (which are a source of acoustic waves propagating into the ionosphere), and atmospheric internal gravity waves generated by explosions. At distances from the source of up to a thousand kilometers, a repeatability of the pattern of ionospheric disturbances was discovered after each of the six volcanic explosions. At larger distances in the ionosphere, signals from acoustic waves caused by Rayleigh waves are clearly recorded, and isolating signals from atmospheric internal waves is difficult due to the influence of disturbances from other external sources.

*Keywords:* geomagnetic field, critical frequency of the ionospheric F2 layer, variation, explosion, cyclone, wavelet analysis