

УДК 550.510.53+550.38+550.34

## ОТКЛИК НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 10.04.2023 г.

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

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН),  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского РАН (ИДГ РАН), Москва, Россия  
\*e-mail: ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 16.07.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

На основе данных наземных магнитометров и GPS-радиопросвечивания ионосферы проанализированы возмущения в нижней ионосфере и в области максимума ионосферного  $F_2$ -слоя в период извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. В качестве характеристик отклика ионосферы на это событие изучены вариации геомагнитного поля на станциях, расположенных на расстояниях 455 км (Паратунка) и 752 км (Магадан) от вулкана, а также полного электронного содержания ионосферы. Анализ результатов измерений показал, что воздействие на ионосферу осуществляется посредством сейсмических волн Рэлея и атмосферных акустико-гравитационных волн, генерируемых вулканическими эксплозиями. По амплитуде ионосферного сигнала в полном электронном содержании оценена энергия нескольких эксплозий.

DOI: 10.31857/S0016794024010114, EDN: GPTNZW

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования высокоэнергетических наземных источников, к числу которых наряду с землетрясениями, в частности, можно отнести вулканические извержения, представляют интерес не только из-за их влияния на среду обитания человека, но и как примеры сильных воздействий на внешние геосферы, последствия которых позволяют делать выводы о механизмах этих воздействий [Адушкин и Спивак, 2021].

В последнее время ионосферный отклик на подобные события изучают посредством глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), измеряя вариации полного электронного содержания (Total Electron Content, TEC), основной вклад в которые обусловлен максимумом ионизации в верхней ионосфере ( $F$ -слой) (см., например, [Куницын и др., 2011; Соловьева и др., 2022; Dautermann et al., 2009; Heki, 2006; Shults et al., 2016; Nakashima et al., 2016]). При этом в немногочисленных до недавнего времени (до извержения вулкана Хунга в 2022 г.) исследованиях, использующих указанный метод измерений для регистрации ионосферного отклика

именно после вулканических извержений, как правило, сообщали об обнаружении квазипериодических колебаний TEC спустя 10–15 мин после события в диапазоне частот акустических волн (так называемый акустический резонанс). В одной из работ [Dautermann et al., 2009] сообщалось о регистрации возмущений с периодами атмосферных внутренних волн в дополнение к акустическим. В единственной работе [Heki, 2006] после извержения было зарегистрировано возмущение TEC в виде  $N$ -волны, т.е. приход на ионосферные высоты ударной волны. Однако остались практически не изученными следующие вопросы: насколько тип ионосферного отклика зависит от типа извержения и его энергии, как использовать отклик для определения энергии события и можно ли найти ионосферный отклик не только в верхней, но и в нижней ионосфере.

В настоящей работе сделана попытка ответить на часть указанных вопросов, используя измерения отклика ионосферы в период достаточно сильного извержения вулкана Шивелуч. В частности, посредством наземных магнитомет-

тров и спутников GPS были зарегистрированы вариации геомагнитного поля и ТЕС, которые позволили установить, что воздействие на ионосферу осуществляется посредством сейсмических волн Рэлея и атмосферных акустико-гравитационных волн, генерируемых в моменты эксплозий.

## 2. ОПИСАНИЕ СОБЫТИЯ И ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Шивелуч – один из наиболее крупных вулканов Камчатки. Он включает три основных структуры: вулкан Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный вулкан – Молодой Шивелуч. Высота лавового купола Молодого Шивелуча – 2500 м. Вулкан расположен на пересечении Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на расстоянии 50 км от поселка Ключи Усть-Камчатского района и 450 км от Петропавловска-Камчатского.

Мощное эксплозивное извержение вулкана Шивелуч произошло 10 апреля 2023 г. В ходе эксплозивной активности бо́льшая часть постройки активного купола вулкана Шивелуч оказалась разрушена, вследствие чего образовался кратер диаметром более 1 км. Отметим, что рост активности вулкана Шивелуч отмечался на протяжении предыдущих нескольких месяцев: наблюдались сход лавин с лавового купола, сильная фумарольная активность, рост температуры тепловой аномалии в районе купола вулкана.

По данным Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВС ДВО РАН), в сейсмических записях было зарегистрировано усиление активности вулкана Шивелуч около 00:54 LT 11 апреля 2023 г. (12:54 UT 10 апреля 2023 г.) (<https://iz.ru/1496490/2023-04-11/na-kamchatke-slyshny-raskaty-ot-izverzeniia-vulkana-shiveluch>). Согласно данным токийского консультационного центра по вулканическим пеплам, столб пепла поднялся на высоту 15.8 км над уровнем моря в 01:10 LT 11 апреля 2023 г. (13:10 UT 10 апреля 2023 г.) и дрейфовал на северо-запад ([https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html)). К 01:58 LT 11 апреля 2023 г. (13:58 UT 10 апреля 2023 г.) шлейф распространился на площадь 75 • 100 км. По данным ИВС ДВО РАН (<http://www.kscnet.ru/ivs/>), в 20:30 UT облако достигло 200 км в длину и 76 км в ширину и распространялось на высотах 6–12 км над уровнем моря. В 23:50 UT облако пепла длиной 400 км и шириной 250 км распространялось на высотах 5–20 км над уровнем моря. Видеонаблюдение за вулканом долгое время было затруднено из-за непогоды

(<https://volcano.si.edu/showreport.cfm?wvar=GVP.WVAR20230405-300270>). По спутниковым данным максимальная высота пепловых выбросов ~20 км над уровнем моря зафиксирована 10 апреля 2023 г. в 20:30 UT (08:30 LT 11 апреля 2023 г.). Примерно с 11:00 LT 11 апреля 2023 г. (23:00 UT 10 апреля 2023 г.) наблюдалось снижение вулканической активности (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index?lang=en>).

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 апреля 2023 г., было определено в шлейфе содержание диоксида серы около 0.2 Мт. Кроме того, по данным КА Himawari-8 фиксировалось повышенное содержание водного раствора серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [[https://dvrcpod.ru/News.php&id\\_new=46639](https://dvrcpod.ru/News.php&id_new=46639)].

По сейсмическим данным Камчатской вулканической станции 10 апреля 2023 г. с 12:54 до 21:10 UT регистрировались сейсмические события, сопровождавшие пароксизмальную фазу извержения вулкана (<http://volkstat.ru/>). Значительные импульсы активности произошли примерно в 14:00, 15:20 UT, а затем около 18:00 UT началась более сильная фаза. В 17:44, 18:46, 19:14 UT произошли поверхностные события, возможно, сопровождавшие пепловые выбросы до 18 500–20 000 м ± 4770–5220 м над уровнем моря и/или сход пирокластических потоков.

В близлежащих населенных пунктах Усть-Камчатского района (Ключи, Майское и Козыревский) наблюдались пеплопады. В частности, в 18:30 UT пеплопад начался в поселке Ключи (45 км к юго-западу от места извержения вулкана), и примерно в 19:00 UT большой столб черного пепла перекрыл дневной свет. Именно в поселке Ключи выпала основная масса пепла. Примерно в 21:30 UT шлейф достиг пос. Козыревский (112 км к юго-западу от места извержения вулкана). Были видны почти постоянные удары молний в шлейфе, и примерно до 22:00 UT были слышны звуки, похожие на раскаты грома. Небо над пос. Козыревский посветлело примерно в 22:30 UT. В некоторых районах Камчатки толщина слоя выпавшего пепла составила более 6 см, в частности в пос. Ключи выпало 8.5 см пепла (<https://volcano.si.edu/showreport.cfm?wvar=GVP.WVAR20230405-300270>). Выпадение такого значительного количества пепла здесь регистрировалось в 1964 г. (<https://meteojournal.ru/izverzhenie-vulkana-shiveluch-na-kamchatke/>).

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

Анализ данных каталога землетрясений Геологической службы США (<https://www.earthquake.usgs.gov>) показал, что в период с 00:00 UT 10 апреля 2023 г. по 01:00 11 апреля 2023 г. не было зарегистрировано ни одного землетрясения магнитудой  $\geq 6.0$ . Наблюдалось всего два землетрясения магнитудой  $> 5.2$  и шесть магнитудами  $\geq 5.0$  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  $Kp$  и  $ap$  (<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 апреля 2023 г. магнитное поле было умеренно возмущено ( $Kp = 3_+$ ,  $ap = 9$  нТл,  $K(PEF) = 3$ ). Кроме того, был проведен сравнительный анализ вариаций  $Bz$ -компоненты межпланетного магнитного поля (<https://www.swpc.noaa.gov/products/>) и компоненты магнитного поля, зарегистрированных на близких к месту извержения вулкана станциях Паратунка и Магадан. В ходе визуально-сопоставительного анализа и оценки вейвлет-когерентности [Grinsted et al., 2004; Maraun and Kurths, 2004] нами было получено, что в период землетрясений 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].

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Во-первых, в ходе настоящих исследований привлекались данные регистрации восточной компоненты геомагнитного поля, выполненной на относительно близких к вулкану Шивелуч станциях Паратунка и Магадан Института космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук. Ближайшая ст. Пара-

тунка (52.971° N; 158.248° E) расположена на расстоянии 455 км от вулкана Шивелуч, ст. Магадан (60.051° N; 150.728° E) расположена на расстоянии 725 км.

Использовались данные инструментальных наблюдений за вариациями геомагнитного поля с дискретизацией 1 мин, представленные на сайте Международной сети INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). Исследование возмущений геомагнитного поля посредством магнитометров позволяет, в частности, выделять вариации ионосферного тока на высотах нижней ионосферы около 100 км (E-слой), где расположен наиболее высокопроводящий слой ионосферной плазмы.

Во-вторых, для исследования отклика верхней ионосферы на извержение вулкана Шивелуч использовалось радиопросвечивание ионосферы сигналами ГНСС, позволяющее регистрировать вариации ТЕС ионосферы вдоль луча спутник – приемник. Основным вклад в ТЕС вносит F-область ионосферы, где расположен максимум электронной концентрации. Использовались данные, полученные в базовом пункте Петропавловск (pett). Для шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч 10 апреля 2023 г. отбирались данные спутников, наиболее близких (в радиусе 500 км) к месторасположению вулкана.

В качестве основного метода исследования геомагнитных вариаций 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 [Meyer, 1993]. В настоящей работе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [Torrence and Compo, 1998], а в качестве базисного вейвлета использовался вейвлет Морле [Grossmann and Morlet, 1984]. Представление результатов вейвлет-преобразования оформлено в виде скалограмм (локальный спектр энергии) с учетом “краевых” эффектов (конус влияния) [Riabova, 2018].

### 4. ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК

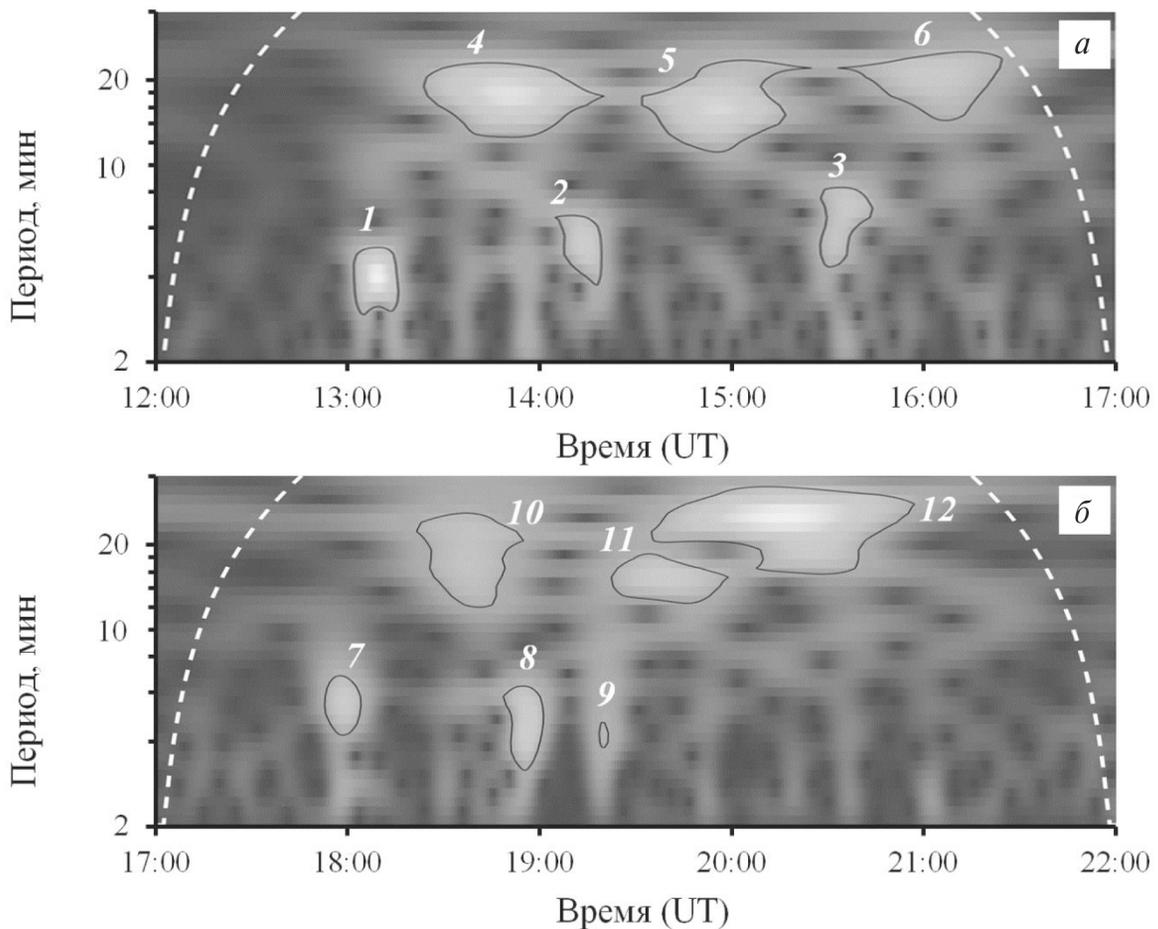
Как показывает анализ временных вариаций геомагнитного поля, в период исследуемого нами извержения в вариациях геомагнитного поля проявляются квазипериодические колебания. Важно отметить, что при визуальном осмо-

тре данных выделение аномалий, сопутствующих землетрясению, во временных вариациях магнитного поля Земли затруднено, даже в вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля, наименее подверженной влиянию солнечной активности, нельзя четко выделить аномалии, сопровождающие вулканическую активность.

В целях поиска геомагнитных вариаций, связанных с сейсмическими событиями, и получения информации об их частотном составе в настоящей работе выполнялся спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования.

Скалограммы восточной горизонтальной  $V_x$  составляющей геомагнитного поля на ближайшей ст. Паратунка после извержений Шивелуч 10 апреля 2023 г. приведены на рис. 1, где в виде двух отдельных скалограмм приведен период за

$\sim 1$  ч до и  $\sim 4$  ч после первого начала вулканической активности Шивелуча (рис. 1а), а также приблизительно за  $\sim 1$  ч до и  $\sim 4$  ч после повторной (более мощной) активизации Шивелуча (рис. 1б). Как видно из рис. 1, скалограммы геомагнитных вариаций характеризуются рядом спектральных гармоник. Всего на скалограммах присутствуют 12 аномалий. Первая аномалия 1 с периодом  $\sim 3$ –5 мин появляется спустя  $\sim 8$  мин после начала активности вулкана Шивелуч, 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  $\sim 3.5$ –6.0 мин и  $\sim 4$ –8 мин соответственно. Спустя примерно 40 мин после начала активности вулкана Шивелуч возникают колебания (4) с периодом  $\sim 12$ –23 мин. В скалограмме, представленной на рис. 1, присутствуют



**Рис. 1.** Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Паратунка в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12:00 UT по 17:00 UT 10 апреля 2023 г. (с 00 LT по 5 LT 11 апреля 2023 г.) (а) и с 17:00 UT по 22:00 UT 10 апреля 2023 г. (с 5 LT по 10 LT 11 апреля 2023 г.) (б); белые штриховые линии — конус влияния.

еще две аномалии (5 и 6), возникающие примерно через 30–40 мин после значительных импульсов активности, наблюдавшихся примерно в 14:00 и 15:20 UT. Периоды этих колебаний составляют ~10–24 и ~14–25 мин. После повторной (более мощной) вулканической активности Шивелуча также в скалограмме идентифицируются шесть аномалий. Как видно из рис. 1, аномалия 7 с периодом ~4–7 мин появляется спустя ~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 ~3–6 мин и ~3.5–4.5 мин соответственно. Спустя примерно 30–40 мин после начала повторной активности вулкана Шивелуч возникают колебания (10) с периодом ~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 12–20 мин и аномалия 12 с периодом 15–33 мин), которые возникают примерно через 30–40 мин после соответствующего события.

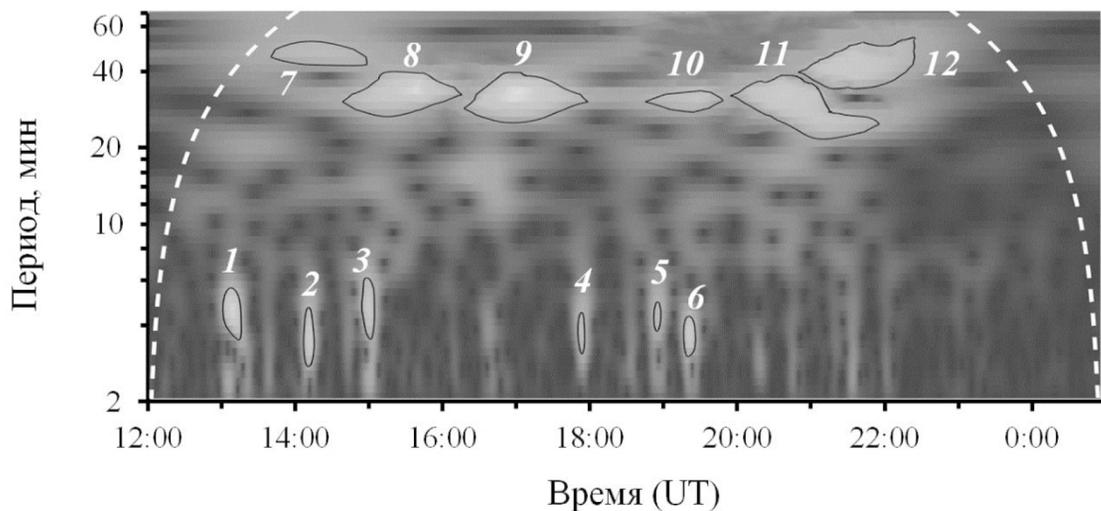
Практически такая же картина наблюдается в скалограмме (рис. 2), вычисленной по данным более удаленной ст. Магадан. В геомагнитных вариациях на ст. Магадан возникают аномалии через ~9–10 мин после шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч в 12:54, 14:00, 15:20, 17:44, 18:46, 19:14 UT. Соответствующие аномалии имеют следующие периоды: ано-

малия 1 – 3.5–6.0 мин, аномалия 2 – 2.5–4.5 мин, аномалия 3 – 3.5–6.0 мин, аномалия 4 – 3–5 мин, аномалия 5 – 3.5–5.0 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 апреля 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.

## 5. ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В настоящей работе для анализа отклика верхней ионосферы использовались данные спутников GPS, позволяющие определять вариации полного электронного содержания ионосферы (ТЕС), количественно измеряемого в единицах TECU (TEC Units, TECU, 1 TECU =  $10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>).

Вариации ТЕС с периодами от нескольких минут до первых десятков минут, наблюдаемые несколькими навигационными спутниками, ионосферные проекции трасс которых расположены в ближней зоне, могут быть обусловлены как процессами при извержении вулкана, так и другими причинами, например, возмущенным состоянием геомагнитного поля, солнечной активностью. Для снижения влияния упомянутых



**Рис. 2.** Скалограммы геомагнитных вариаций на ст. Магадан в период шести эпизодов повышенной активности вулкана Шивелуч с 12.00 UT 10 апреля 2023 г. по 01.00 UT 11 апреля 2023 г. (с 0 LT по 13 LT 11 апреля 2023 г.); белые штриховые линии – конус влияния.

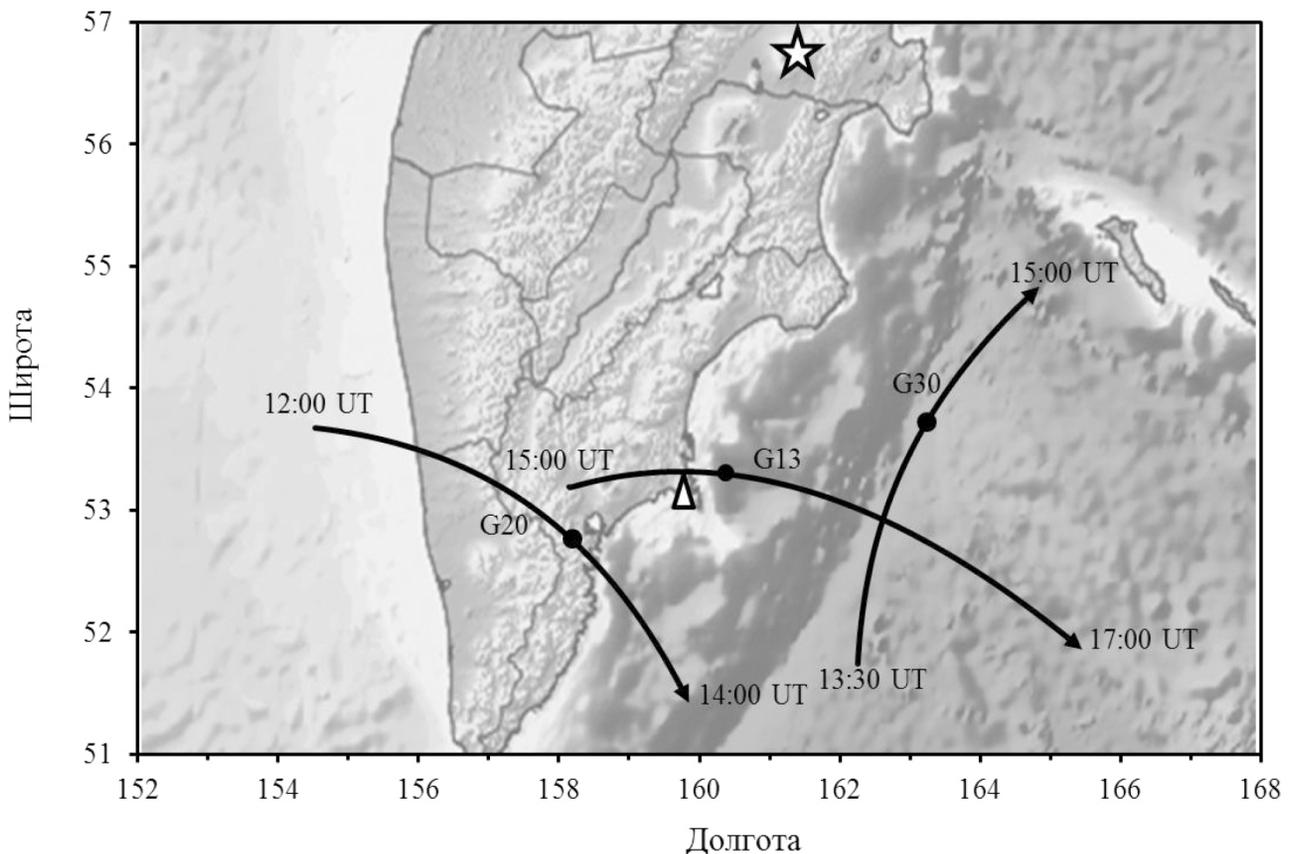
факторов и исследования ионосферного отклика только в акустическом диапазоне была применена полосовая фильтрация Баттерворта 7-го порядка.

По станции *rett* из 32 спутников GPS были выделены те спутники, которые вблизи рассматриваемой эксплозии (от 5 мин до и 15 мин после события) находились на расстоянии менее 400 км. На рис. 3 приведены проекции трасс спутников на ионосферу, данные которых использованы в настоящем анализе. На траекториях указано время пролета, кружком обозначен максимум амплитуды сигнала после эксплозивного события. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты фильтрации вариаций ТЕС в диапазоне 61–1000 с для первых трех эксплозий, рассматриваемых в работе. Как видно из данных, представленных на рис. 4, в первые 10–15 мин после эксплозивного события наблюдается характерный для ударных волн сигнал в виде *N*-волны, состоя-

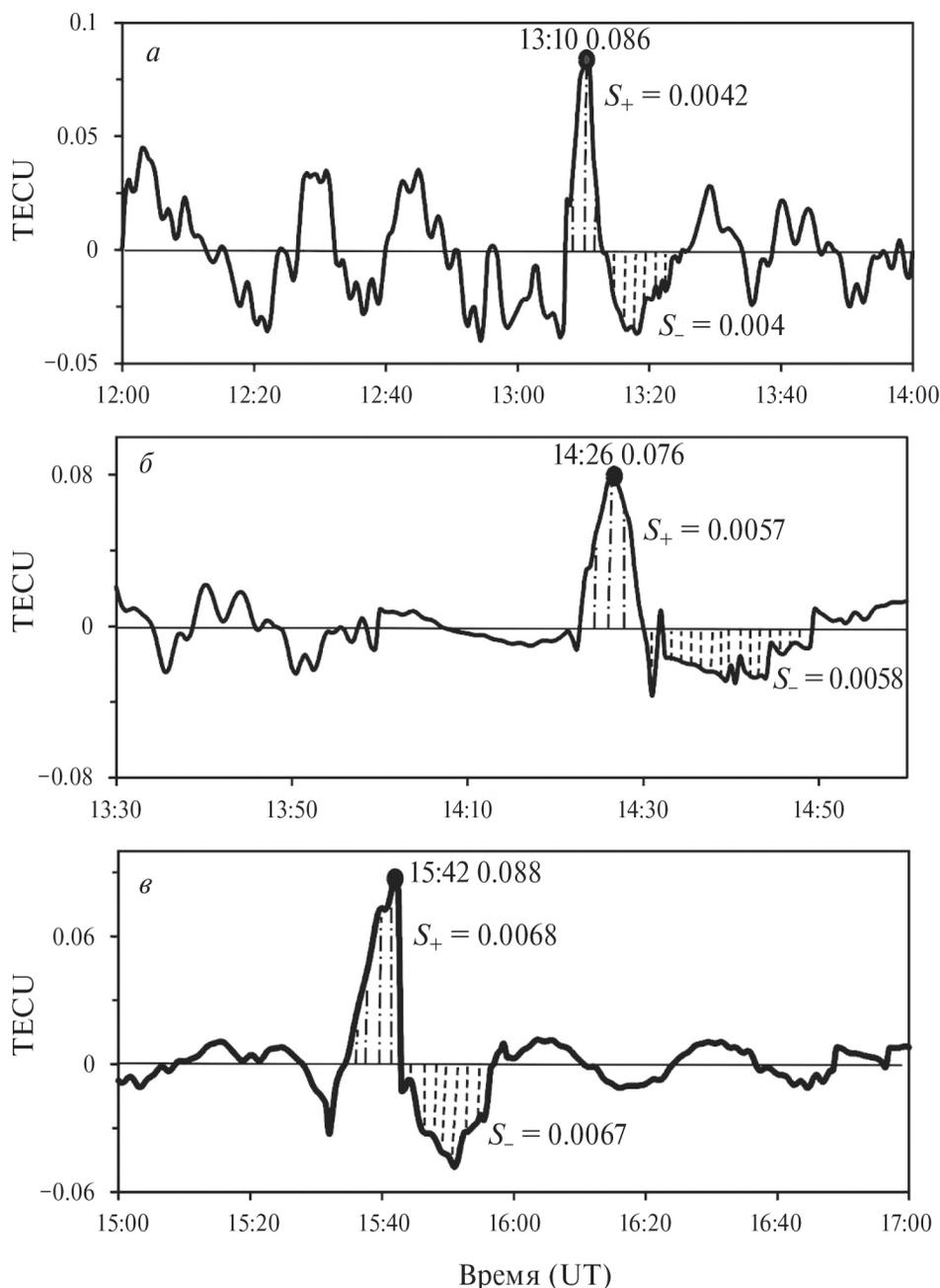
щей из фазы сжатия и фазы разрежения, каждая из которых содержит разрыв (ударный фронт) [Ландау и Лифшиц, 1986]. Такой отклик является следствием нелинейных эффектов распространения сигнала от импульсного источника большой мощности в атмосфере (см. например, [Павлов, 1986]). При этом площадь под положительной фазой *N*-волны равна площади под отрицательной. Поскольку на высотах *F*-области масштабы неоднородности атмосферы, ионосферы и акустического импульса — одного порядка, возможна лишь приблизительная оценка параметров акустического импульса.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сейсмические события, сопровождаемые при извержении вулкана пепловыми выбросами, свидетельствуют об импульсном выделении энергии. В этом случае вулкан можно уподобить точечному импульсному источнику (как земле-



**Рис. 3.** Географическая карта с проекциями траекторий GPS-спутников для приемной станции *rett* (местоположение станции обозначено треугольником). Направление проекции трассы обозначено стрелкой с указанием времени начала и окончания (UT = LT – 12). Максимум вариаций ТЕС для каждой проекции траектории обозначен кружком. Местоположение вулкана Шивелуч обозначено звездой.



**Рис. 4.** Фильтрованные сигналы ТЕС и вычисления площадей фазы сжатия (штрихпунктир) и разрежения (штриховка): по паре “станция – спутник” pett-G20 за интервал 12:00–14:00 UT 10 апреля 2023 г. (00:00–02:00 LT 11 апреля 2023 г.) (*a*), pett-G30 за интервал 13:30–15:00 UT 10 апреля 2023 г. (01:30–03:00 LT 11 апреля 2023 г.) (*б*), pett-G13 за интервал 15:00–17:00 UT 10 апреля 2023 г. (03:00–05:00 LT 11 апреля 2023 г.) (*в*); точка — максимальная величина фильтрованного сигнала на рассматриваемом интервале.

трясение), в результате действия которого можно ожидать генерации акустико-гравитационных волн (АГВ). В частности, сейсмические события являются источником сейсмических поверхностных волн Рэлея, которые, как известно,

способны генерировать акустические волны, распространяющиеся на ионосферные высоты (см., например, [Шалимов, 2018]).

Рассмотрим сначала появление АГВ-сигналов в нижней ионосфере, отклик на которые может быть

зарегистрирован магнитометрами (см. например, [Куницын и Шалимов, 2011]). Как было отмечено при описании геомагнитных откликов (см. рис. 1 и 2), их можно разделить на две группы: первая группа сигналов после активизации источника приходит в ионосферу над станциями заметно быстрее второй. Расстояния от действующего вулкана до станций Паратунка (425 км) и Магадан (725 км) таковы, что систематическая регистрация сигналов первой группы в подионосферной точке с периодами 3–5 мин через 7–8 мин (на ст. Паратунка) и через 9–10 мин (на ст. Магадан) после активизаций вулкана в 12:54, 14:00, 15:20, 17:44, 18:46, 19:14 UT вполне соответствует приходу сейсмической волны Рэлея на станцию.

Вторая группа регистрируемых сигналов имеет в основном периоды 10–20 мин (на ст. Паратунка) и 25–35 мин (на ст. Магадан) и появляется через 30–40 мин и 40–50 мин на ст. Паратунка и Магадан соответственно. Диапазон периодов соответствует атмосферным внутренним волнам, источником которых 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 – Вайсяля,  $L$ ,  $h$  – 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 2).

Рассмотрим теперь возмущения, зарегистрированные при радиопросвечивании посредством GPS. Как видно из рис. 4, возмущения плотности плазмы в  $F$ -области в ближней зоне после трех первых активизаций вулкана в 12:54, 14:00, 15:20 UT имеют форму  $N$ -волны (аналогично и после остальных трех), т.е. речь идет о приходе ударной волны после эксплозий. Время прихода импульса соответствует интервалу 10–17 мин после события, т.е. времени распространения акустического импульса до  $F$ -области. Важно, что форма импульса демонстрирует равенство площадей под положительной и отрицательной фазами, т.е. характерную особенность ударной волны [Ландау и Лифшиц, 1986].

Зная амплитуду импульса, можно оценить энергию землетрясения. Для ее грубой оценки воспользуемся скейлингом, который следует из сопоставления с источниками известной энер-

гии. После землетрясения в Тохоку с энергией  $6.24 \cdot 10^{17}$  Дж вариации ТЕС достигали 3 ТЕСУ [Куницын и др., 2011]. Поскольку энергия волны пропорциональна квадрату амплитуды, то для наблюдаемых после событий всплесков амплитуд вариаций порядка 0.09; 0.08; 0.09 ТЕСУ получим приблизительные оценки величин поверхностной энергии  $5.6 \cdot 10^{14}$ ,  $4.4 \cdot 10^{14}$ ,  $5.6 \cdot 10^{14}$  Дж соответственно.

Таким образом, на основе данных наземных магнитометров и GPS- радиопросвечивания ионосферы 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 вариации магнитного поля и полного электронного содержания ионосферы. Анализ результатов измерений показал, что воздействие на ионосферу осуществляется посредством сейсмических волн Рэлея и атмосферных акустико-гравитационных волн, генерируемых вулканической активностью. Этот вывод основан на повторяемости картины ионосферных возмущений после каждой из шести вулканических эксплозий. По амплитуде ионосферного сигнала в полном электронном содержании оценена энергия нескольких вулканических эксплозий.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00182).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Сивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. № 5. С. 6–16. 2021.
- Куницын В.Е., Шалимов С.Л. Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 5. С. 75–78. 2011.
- 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. Т. 94. № 8. С. 657–661. 2011.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
- Павлов В.А. Акустический импульс над эпицентром землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 5. С. 807–815. 1986.
- 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 в ЖЭТФ. Т. 116. № 11. С. 816–822. 2022.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН, 390 с. 2018.
- Adhikari B., Khatiwada R., Chapagain N.P. Analysis of geomagnetic storms using wavelet transforms // Journal of Nepal Physical Society. V. 4. № 1. P. 119–124. 2017.
- 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 // J.-Geophys. —Sol. Ea. V. 114. N B02. 2009.  
DOI: 10.1029/2008JB005722
- Grinsted A., Moor J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical timeseries // Nonlinear Proc. Geoph. V. 11. P. 561–566. 2004.
- Grossmann A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM J. Math. Anal. V. 15. № 4. P. 723–736. 1984.
- Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances // Geophys. Res. Lett. V. 33. N L14303. 2006.  
DOI: 10.1029/2006GL026249
- Kelley M.C. The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics. San Diego, California: Academic Press, Inc. 487 p. 1989.
- Maraun D., Kurths J. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls // Nonlinear Proc. Geoph. V. 11. P. 505–514. 2004.
- Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 134 p. 1993.
- Nakashima Y., Heki K., Takeo A., Cahyadi M.N., Aditiya A., Yoshizawa K. Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals // Earth Planet. Sc. Lett. V. 434. P. 112–116. 2016.
- Riabova S.A. Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations // J. Phys. Conf. Ser. V. 1141. 2018.  
DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012146
- Riabova S.A. Study of the multifractality of geomagnetic variations at the Belsk Observatory // Dokl. Earth Sci. V. 507. № 2. P. 299–303. 2022.  
DOI: 0.1134/S1028334X22700489.
- Shults K., Astafyeva E., Adourian S. Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events // J. Geophys. Res. — Space. V. 121. № 10. P. 10,303–10,315. 2016.  
DOI: 10.1002/2016JA023382
- Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // B. Am. Meteorol. Soc. V. 79. P. 605–618. 1998.

## Response of the lower and upper ionosphere after the eruption of Shiveluch volcano on april 10, 2023

S. A. Riabova<sup>1,2,\*</sup>, S. L. Shalimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: ryabovasa@mail.ru

The disturbances in the lower ionosphere and in the region of the maximum of the ionospheric *F2* layer during the Shiveluch volcanic eruption in April 2023 are analyzed based on data from ground-based magnetometers and GPS radio sounding of the ionosphere. The magnetic stations were located at distances of 455 km (Paratunka) and 752 km (Magadan) from the volcano. The variations in the magnetic field and total electron content of the ionosphere were studied as characteristics of the ionospheric response to this event. An analysis of the measurements showed that the impact on the ionosphere is carried out by seismic Rayleigh waves and atmospheric acoustic-gravity waves generated by volcanic explosions. The energy of several explosions was estimated from the amplitude of the ionospheric signal in the total electron content.

**Keywords:** explosion, Rayleigh wave, atmospheric acoustic-gravity waves, geomagnetic variations, total electron content.