

УДК 551.510.53;551.21

ОБ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА СТРОМБОЛИ

© 2024 г. С. А. Рябова^{a, b, *}, С. Л. Шалимов^{a, **}

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^bИнститут динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,
Ленинский просп., 38, корп. 1, Москва, 119334 Россия

*e-mail: riabovasa@mail.ru

**e-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 04.07.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

На основе данных наземного вертикального зондирования ионосферы анализируются возмущения в области максимума ионосферного F2-слоя в период сильного извержения вулкана Стромболи (Италия) в виде двух эксплозий в июле и августе 2019 г., а также после возобновления вулканической активности 9 октября 2022 г. В качестве характеристики отклика ионосферы на эти события изучаются вариации критической частоты F2-слоя на расположенных вблизи (не далее 450 км) от вулкана станциях “Гибильманна”, “Рим” и “Сан Вито”. Результаты измерений свидетельствуют о воздействии на ионосферу атмосферных акустико-гравитационных волн, генерируемых вулканической активностью и обуславливающих возникновение в ионосфере долгоживущих возмущений.

Ключевые слова: вулканическое извержение, критическая частота F2-слоя, вейвлет-анализ, пароксизм

DOI: 10.31857/S0203030624010084, EDN: PSJQUN

ВВЕДЕНИЕ

Исследования высокоэнергетических наземных источников, к числу которых можно отнести вулканические извержения, интересны как из-за их влияния на среду обитания человека, так и как примеры сильных воздействий на внешние геосферы, позволяющие судить о механизмах этих воздействий.

В последнее время ионосферный отклик на подобные события изучают посредством ГНСС, измеряя вариации полного электронного содержания (ПЭС) (см., например, [Куницын и др., 2011; Dautermann et al., 2009]). При этом предполагается, что основной вклад в ПЭС обусловлен максимумом ионизации в верхней ионосфере. Между тем традиционное вертикальное зондирование ионосферы посредством наземных ионозондов, используемое, в частности, для изучения вариаций плотности в максимуме

ионизации, также остается достаточно информативным инструментом исследований.

В настоящей работе посредством вертикального зондирования ионосферы проводится анализ и интерпретация специфических вариаций критической частоты ионосферного F2-слоя в период сильного извержения вулкана Стромболи в виде двух эксплозий в июле и августе 2019 г. [Спивак и др., 2020; Спивак, Рябова, 2020], а также после возобновления вулканической активности 9 октября 2022 г.

Действующий вулкан Стромболи расположен на одноименном маленьком вулканическом острове, в архипелаге Липарских островов, в Тирренском море, примерно в 75 км к северу от о. Сицилия. Географические координаты — 38.786° с.ш., 15.218° в.д. Вулкан Стромболи состоит из более древнего и разрушенного андезитового конуса и современного базальтового

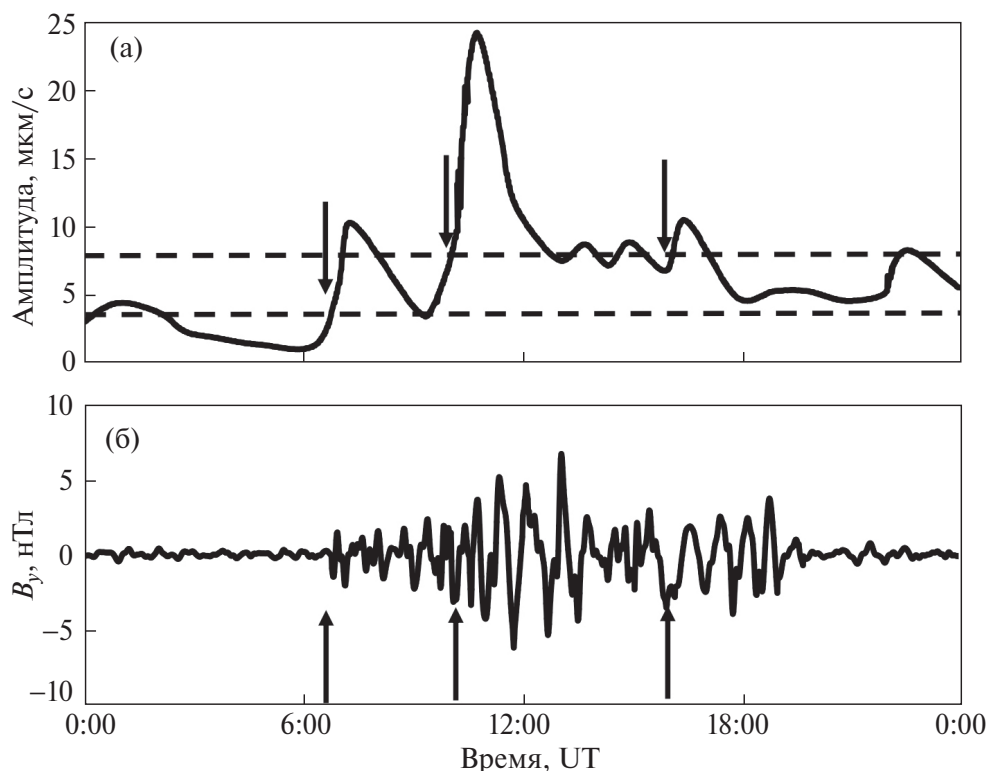


Рис. 1. График вулканического дрожания Стромболи (запись вверх-вниз) за 09.10.2022 г., адаптированный из данных, представленных на сайте [<http://www.ct.ingv.it/>] (a); вариации геомагнитного поля на станции “Гальяно” за 09.10.2022 г. (б); стрелками обозначены начала высоких значений вулканического дрожания.

усеченного конуса [Giordano, De Astis, 2021]. Высота вулкана Стромболи составляет свыше 900 м над уровнем моря; примерно две трети общей высоты находится под водой.

По данным бюллетеня Национального института геофизики и вулканологии Италии (INGV) № 84/2019 от 09.07.2019 г. [<https://www.ct.ingv.it>] вулкан Стромболи активизировался в ~13:45 UT 3 июля 2019 г., при этом наблюдалось повышенное газовыделение на участке склона, расположенного в ~100 м от кратера. В ~14:45 UT произошла сильная эксплозия (пароксизм) на всей террасе кратера, породившая два пирокластических потока, которые продвинулись примерно на 1 км по морю за пределы береговой линии. Столб извержения поднялся примерно на 4 км над вершиной и сопровождался интенсивным выпадением шлака и пемзы, в основном вокруг деревни Гиностра в юго-западном секторе вулкана. Средняя вертикальная скорость радиально расширяющегося облака взрыва составляла ~ 91–103 м/с в первые 2 с после взрыва [Andronico et al., 2021].

28 августа 2019 г. в 10:17 UT произошел новый пароксизм. Событие затронуло центрально-южную часть террасы кратера. Столб извержения поднялся более чем на 4 км, вулканические продукты выпали вдоль склонов вулкана, достигая береговой линии. Вулканическая активность сопровождалась образованием вдоль Скьяра-дель-Фуоко пирокластического потока, вызвавшего цунами.

По данным бюллетеня Национального института геофизики и вулканологии Италии (INGV) № 41/2022 от 11.10.2022 г. [<https://www.ct.ingv.it>]¹ вулканическое дрожание, сопровождающееся развитием эксплозивной активности, усилилось по амплитуде с 06:24 UT и наблюдалось на высоком уровне в период между 10 и 12 UT и около 16:00 UT 09.10.2022 г. (рис. 1a). В 09:22 LT (07:22 UT) системой мониторинга был зафиксирован пирокластический поток, сошедший в море, и последующее обрушение части обода кратера.

¹ Национальный институт геофизики и вулканологии Италии (INGV). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ct.ingv.it/> (дата обращения: 28.01.2023).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Если рассматривать извержение вулкана как точечный источник взрывного типа, то можно ожидать возбуждение в атмосфере (в том числе в результате эксплозий и вулканического дрожания) акустико-гравитационных волн (АГВ). Эти волны характеризуются тем, что имеют вертикальные скорости, которые позволяют им достигать ионосферы, где за счет столкновений движущихся нейтральных частиц с ионами возможно возникновение вариаций плотности плазмы, т.е. возможен ионосферный отклик, регистрируемый, например, посредством ионозондов.

В качестве характеристики ионосферы в нашем исследовании использовались результаты определения критической частоты F2-слоя на основе анализа ионограмм, полученных в ходе высотно-частотного зондирования ионосферы на станциях “Гибильманна”, “Рим” и “Сан Вито” (табл. 1).

Ионограммы регистрируют следы отражений высокочастотных импульсных радиосигналов, генерируемых ионозондами, от различных слоев ионосферы. Обработка и анализ ионограмм дают информацию о состоянии основных ионосферных слоев (F2, F1, E, Es) [Perrone et al., 2017; Mochalov, Mochalova, 2019] и о высотном профиле электронной концентрации в ионосфере [Scotto, 2009; Scotto et al., 2012].

На станциях наземного зондирования ионосферы “Гибильманна” и “Рим”, расположенных на расстояниях от вулкана ~170 и 440 км соответственно, зондирование выполнялось каждые 15 мин с помощью ионозонда AIS-INGV. Технические характеристики ионозонда: мощность излучения передатчика 5–10 Вт, диапазон зондируемых частот 1–20 МГц, длительность сканирования по частоте 3 мин. Высотно-частотное зондирование на станции “Сан Вито”, расположенной на расстоянии 345 км от вулкана, проводилось с дискретизацией

15 мин (2019 г.) и 7.5 мин (2022 г.) с помощью дигизонда DPS-4D. Технические характеристики ионозонда: мощность излучения передатчика 300 Вт, диапазон зондируемых частот 1–30 МГц, длительность зондирующего импульса 533 мкс.

Ионограммы и результаты их автоматической обработки размещены на сайте Национального института геофизики и вулканологии Италии [<http://www.ct.ingv.it/>]. При проведении настоящих исследований в процессе анализа экспериментальных данных каждая ионограмма подвергалась ручной обработке и интерпретации по методике URSI [Руководство ..., 1977]. Следует отметить, что определение ионосферных характеристик, в том числе критической частоты F2-слоя, часто затруднено. При анализе ионограмм отсутствие измерений или сомнительность в правильности определения характеристики помечались в соответствии с принятыми обозначениями [Wakai et al., 1987].

При выполнении настоящих исследований проводился анализ особенностей временных и спектральных вариаций цифрового ряда значений критической частоты F2-слоя. Следует отметить, что с целью выделения малоамплитудных аномалий в вариациях критической частоты F2-слоя ионосферы оценивались фоновые вариации f_0F2 , как медианные значения (уровень показателя, который делит набор данных на две равные половины) за месяц, в котором происходило рассматриваемое извержение вулкана Стромболи.

Мы использовали в нашей работе спектральный анализ вариаций f_0F2 с применением вейвлет-анализа, обеспечивающий заметные преимущества по сравнению с классическим спектральным анализом и позволяющий получить временные локализации спектральных компонент временного ряда [Астафьева, 1996; Torrence, Compo, 1998]. Метод вейвлет-анализа показал свою эффективность при анализе геомагнитных вариаций [Adhikari et al., 2017;

Таблица 1. Пункты наземного зондирования ионосферы

Пункт	URSI	Широта	Долгота	Расстояние	Ионозонд
Гибильманна	GM037	37.9	14.0	167	AIS-INGV
Рим	RO041	41.9	12.5	443	AIS-INGV
Сан Вито	VT139	40.6	17.8	345	Дигизонд DPS-4D

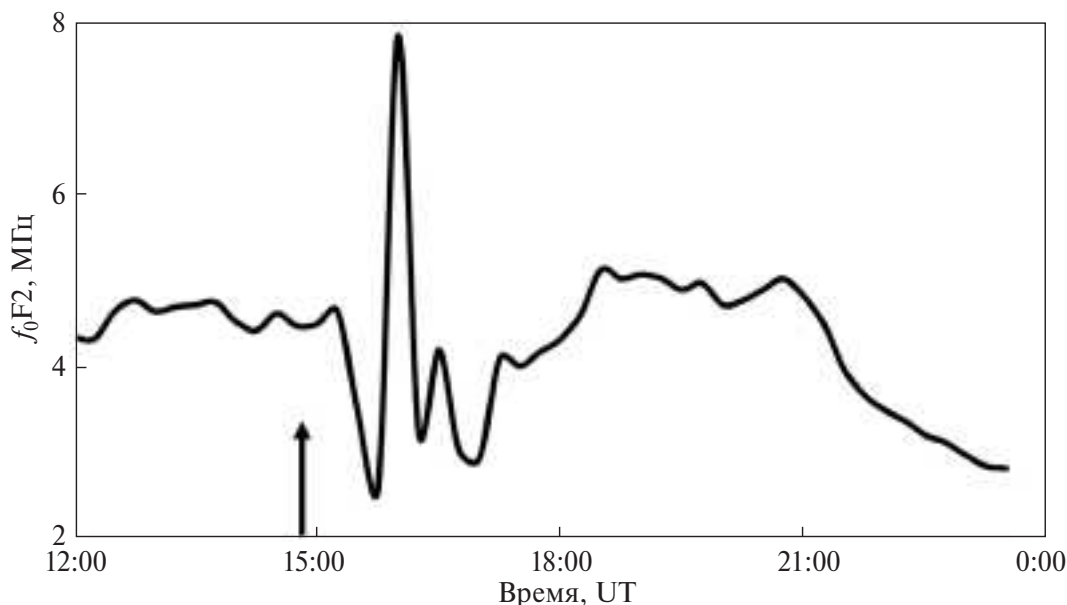


Рис. 2. Вариации критической частоты F2-слоя f_0F2 за 03.07.2019 г. по данным станции “Сан Вито”, момент эксплозии обозначен вертикальной стрелкой.

Riabova, 2022]. Вейвлет-анализ позволяет выявить временные свойства изучаемого временного ряда, получить локальную высокочастотную и глобальную крупномасштабную информацию достаточно точно и без избыточности, а также позволяет судить о том, в какой момент времени появились те или иные компоненты сигнала [Амосов, Муллер, 2014].

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].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА СТРОМБОЛИ

Результаты регистрации суточного хода критической частоты f_0F2 за 03.07.2019 г. на станции “Сан Вито” представлены на рис. 2. Анализ данных о временной изменчивости критической частоты F2-слоя ионосферы свидетельствует о том, что активная стадия вулканического извержения сопровождается вариациями f_0F2 на станции “Сан Вито” в виде снижения

с 4.5 МГц (15:00 UT) до 2.6 МГц (15:45 UT), дальнейшего значительного увеличения до 7.9 МГц (16:00 UT) и снижения до 2.9 МГц (17:00 UT).

Следующая вулканическая активность Стромболи 28 августа 2019 г. вызвала изменения в ходе суточной изменчивости критической частоты F2-слоя ионосферы. На рис. 3 приведены результаты определения критической частоты F2-слоя на станции “Сан Вито”. Данные рис. 3 свидетельствуют о том, что в период приблизительно с 10:30 UT до 13:00 UT было зарегистрировано возникновение хорошо выраженных аномальных вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы, при этом наблюдалось резкое увеличение критической частоты с 4.8 МГц (10:30 UT) до 8 МГц (10:45 UT), резкое снижение до 3 МГц (11:45 UT) и повышение до 5 МГц (13:00 UT) и выход на фоновые значения в 13:30 UT.

Следует отметить тот факт, что рассматривались данные зондирования ионосферы только станции “Сан Вито”, а на станциях “Гибильманна” и “Рим” в рассмотренные периоды активной деятельности вулкана Стромболи в 2019 г. оно не выполнялось.

Доступность данных наземного зондирования ионосферы на станциях “Гибильманна”, “Рим” и “Сан Вито” в период вулканической активности Стромболи 09.10.2022 г.

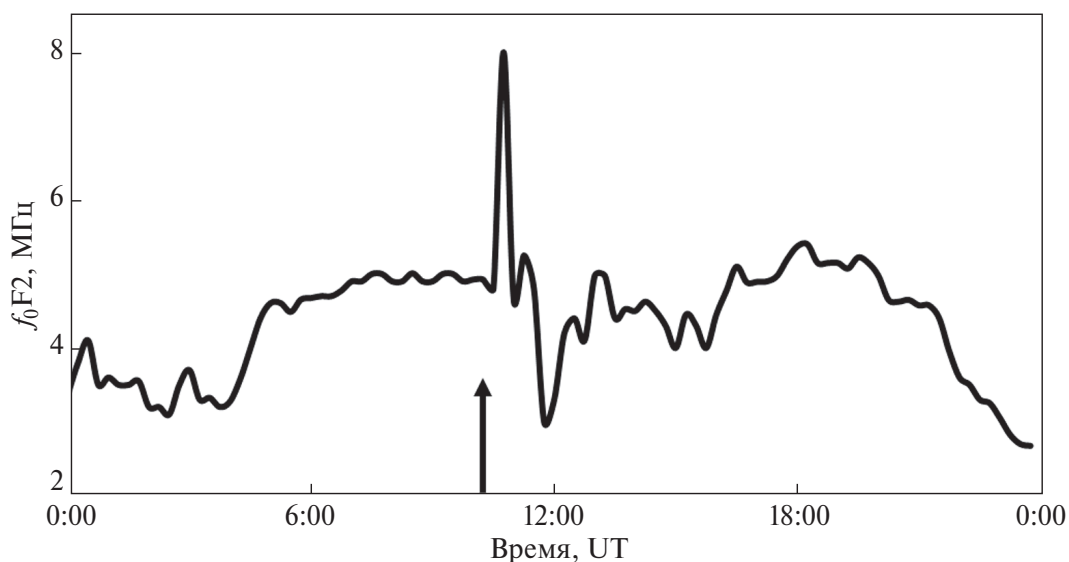


Рис. 3. Вариации критической частоты F2-слоя f_0F2 за 28.08.2019 г. по данным станции “Сан Вито”, момент эксплозии обозначен вертикальной стрелкой.

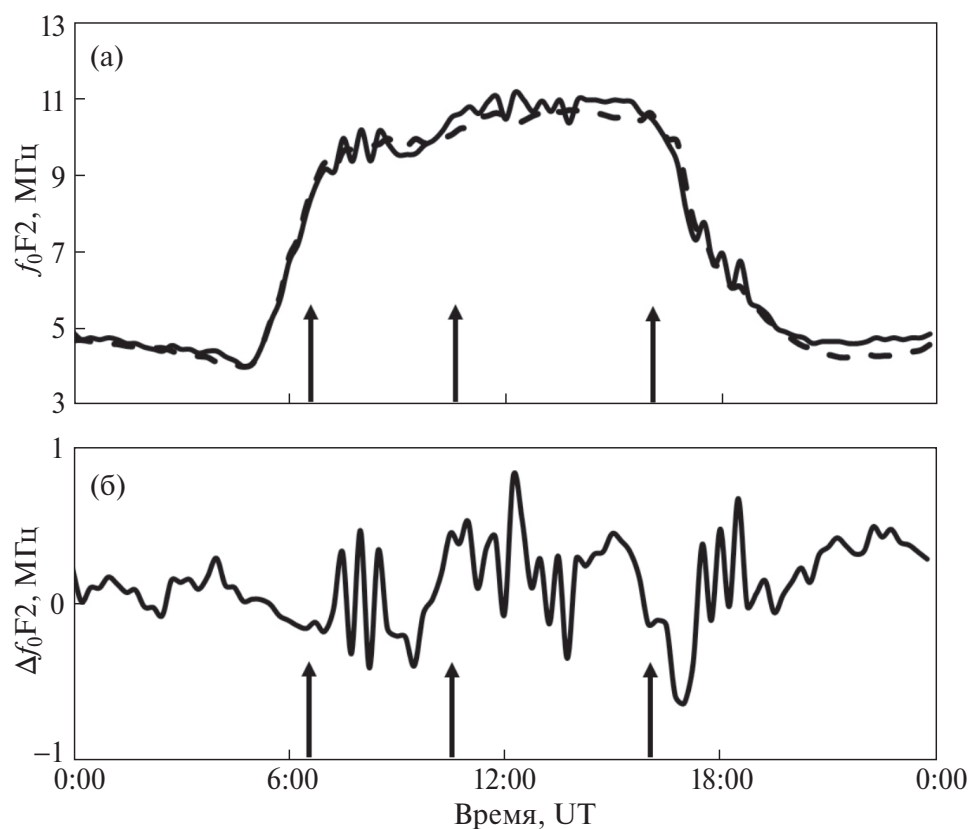


Рис. 4. Суточный ход критической частоты F2-слоя (f_0F2) за 09.10.2022 г. на станции мониторинга ионосферы “Рим” — сплошные линии; медианные месячные значения f_0F2 за октябрь того же года — пунктирные кривые (а); суточный ход разницы Δf_0F2 между значениями f_0F2 за 09.10.2022 г. и медианными значениями за октябрь 2022 г. (б); стрелками обозначены начала высоких значений вулканического дрожания.

предоставила хорошую возможность сравнить отклики F2-слоя ионосферы на этих трех станциях вблизи вулкана. Здесь с целью выделения

малоамплитудных аномалий в вариациях критической частоты F2-слоя ионосферы оценивались фоновые вариации f_0F2 , как медианные

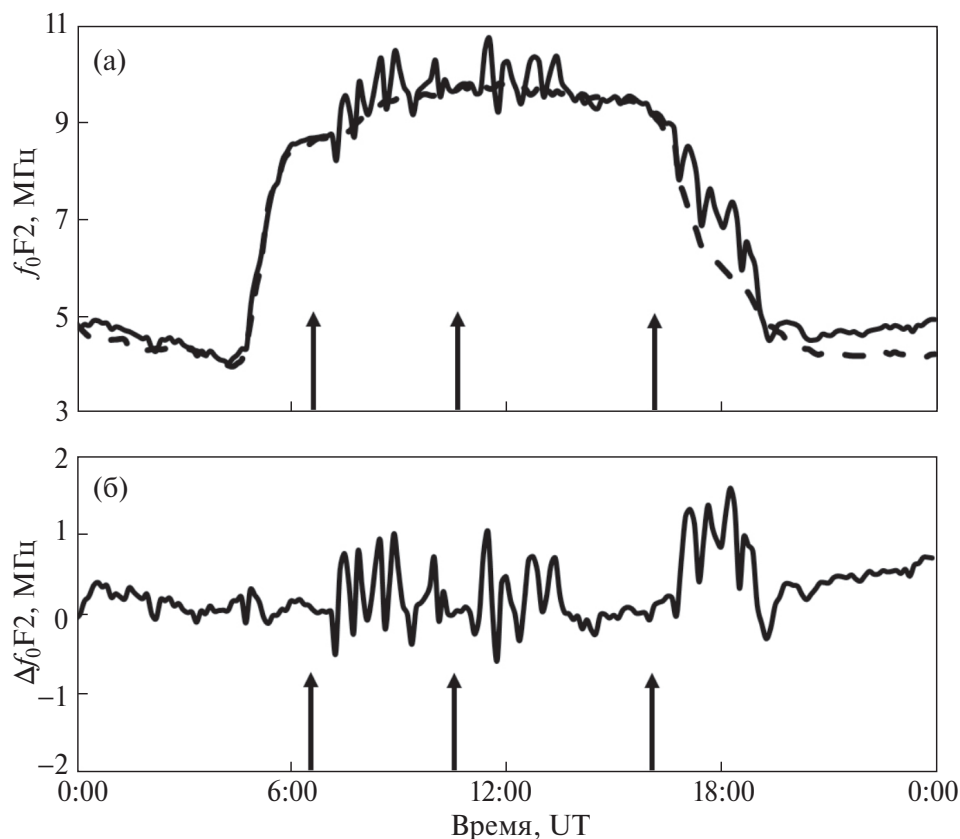


Рис. 5. Суточный ход критической частоты F2-слоя (f_0F2) за 09.10.2022 г. на станции мониторинга ионосферы “Сан Вито” — сплошные линии; медианные месячные значения f_0F2 за октябрь того же года — пунктирные кривые (а); суточный ход разницы Δf_0F2 между значениями f_0F2 за 09.10.2022 г. и медианными значениями за октябрь 2022 г. (б); стрелками обозначены начала высоких значений вулканического дрожания.

значения (уровень показателя, который делит набор данных на две равные половины) за месяц, в который рассматривается эксплозивное событие.

Результаты регистрации суточного хода критической частоты f_0F2 за 09.10.2022 г. на станции “Рим”, а также ее медианные (за октябрь 2022 г.) значения представлены на рис. 4а. Кроме того на рис. 4б приведена разница между значениями f_0F2 за 09.10.2022 г. и медианными значениями за октябрь 2022 г. Анализ данных, представленных на рис. 4, показал следующее. За время с 07:15 до 07:30 UT значение f_0F2 на станции “Рим” увеличилось с 9.3 до 10 МГц, затем снизилось до 9.6 МГц (07:45 UT), далее поднялось до 10.2 МГц к 8:00 UT и вновь снизилось до 9.4 МГц к 8:15 UT, за снижением последовало увеличение до 10.2 МГц (8:30 UT) с последующим снижением до 9.5 (9:00 UT). Заметные увеличения критической частоты F2-слоя ионосферы по сравнению

с фоновыми наблюдались с 11:15 по 13:45 UT и с 17:00 по 18:45 UT.

Аналогичный ход аномалий нами выявлен на станции “Сан Вито”. Результаты регистрации суточного хода критической частоты f_0F2 за 09.10.2022 г. на станции “Сан Вито”, а также ее медианные (за октябрь 2022 г.) значения представлены на рис. 5а. Разница между значениями f_0F2 за 09.10.2022 г. и медианными значениями за октябрь 2022 г. приведена на рис. 5б. Как видно из рис. 5, заметные знакопеременные вариации критической частоты F2-слоя ионосферы по сравнению с фоновыми наблюдались с 07:15 до 09:22 UT, с 11:15 по 13:37 UT и с 16:52 по 19:07 UT.

Особый интерес представляют результаты анализа вариаций на станции “Гибильманна”, расположенной южнее вулкана Стромболи, в отличие от станций “Рим” и “Сан Вито”, находящихся к северу от вулкана. Также отметим, что эта самая близкая к вулкану ионосферная

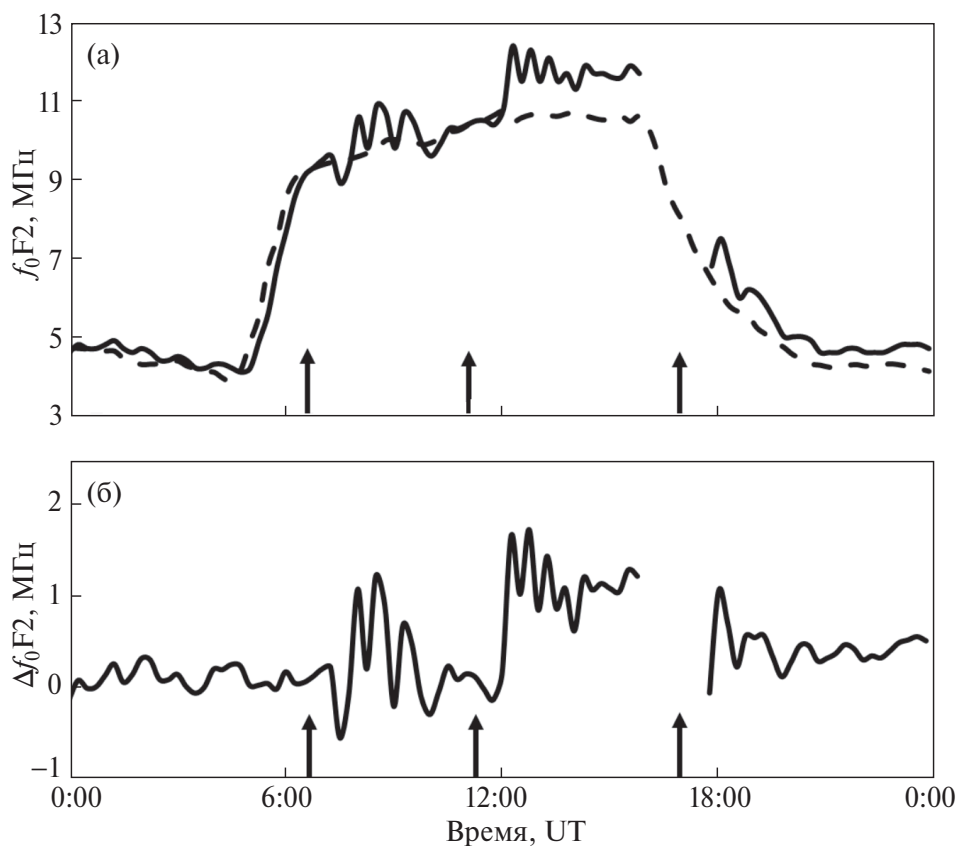


Рис. 6. Суточный ход критической частоты F2-слоя (f_0F2) за 09.10.2022 г. на станции мониторинга ионосферы “Гибильманна” — сплошные линии; медианные месячные значения f_0F2 за октябрь того же года — пунктирные кривые (а); суточный ход разницы Δf_0F2 между значениями f_0F2 за 09.10.2022 г. и медианными значениями за октябрь 2022 г. (б); стрелками обозначены начала высоких значений вулканического дрожания.

станция (см. табл. 1). Как видно из рис. 6, за время с 07:15 до 07:30 UT значение f_0F2 на станции “Гибильманна” снизилось с 9.6 до 8.9 МГц, затем возросло до 10.6 МГц (8:00 UT), далее снизилось до 9.8 МГц к 8:15 UT и вновь повысилось до 10.9 МГц к 8:30 UT, за повышением последовало снижение до 9.8 МГц (9:00 UT) с последующим повышением до 10.7 (9:15 UT). По виду ход аномалий критической частоты F2-слоя на станции “Гибильманна” оказывается противоположным ходу на станциях “Сан Вито” и “Рим”. Однако различное расположение станций относительно эпицентра по расстоянию и по отношению к наклонению геомагнитного поля не позволяет непосредственно сопоставлять наблюдаемые на них возмущения. Заметные увеличения критической частоты F2-слоя ионосферы по сравнению с фоновыми наблюдались с 11:45 по 14:00 UT в виде положительной бухты.

В дополнение к анализу временных вариаций критической частоты F2-слоя был выполнен

спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты вейвлет-анализа в виде оценки локального спектра энергии — скалограммы. Из рис. 7 видно, что отмеченные выше аномалии, связанные с вулканической активностью Стромболи, проявляются в диапазоне частот 30–50 мин. Здесь следует отметить, что более детальную информацию невозможно получить из-за 15-минутного режима зондирования ионосферы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о достаточно интересной картине отклика ионосферы на сопровождающие извержения процессы. Так, в обоих случаях после эксплозий (в июле и августе 2019 г.) и приблизительно через 15 мин после них в ионосфере вблизи от источника

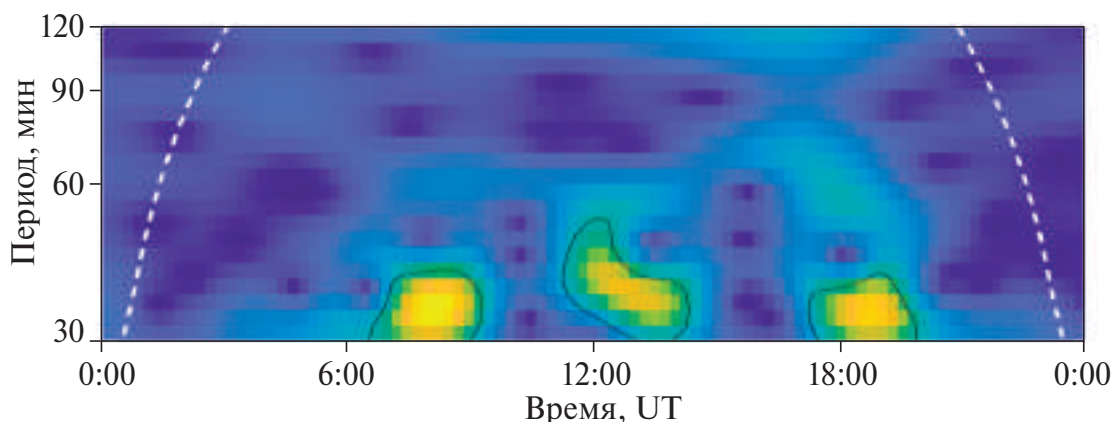


Рис. 7. Скалограмма вариаций критической частоты F2-слоя за 09.10.2022 г. на станции мониторинга ионосферы “Рим”.

были зарегистрированы достаточно продолжительные по времени (от часа до двух) волновые возмущения с периодами порядка 30 мин. Время их появления соответствует распространению акустического импульса до верхней ионосферы. Однако 15-минутный режим зондирования не позволил зарегистрировать точно приход акустического сигнала и его структуру. Вместе с тем, нет оснований предполагать быструю релаксацию возмущения к равновесному состоянию после прохождения акустического импульса. Дело в том, что в месте прохождения акустического импульса во вращающейся атмосфере после исчезновения возмущающей силы происходит процесс геострофической адаптации [Обухов, 1949], при котором часть энергии первоначального возмущения уносится акустико-гравитационными волнами, а другая (вихревая) часть остается локализованной в области первоначального возмущения и его окрестностях. Соответственно, должны существовать долгоживущие локализованные ионосферные возмущения, инициированные импульсными атмосферными процессами и исчезающие под влиянием сравнительно медленной диссипации [Шалимов, 2018]. При этом подобные долгоживущие ионосферные возмущения как раз и могли быть зарегистрированы после эксплозий при вертикальном зондировании (см. рис. 2, 3).

В случае события 09.10.2022 г. появление возмущений F-слоя развивалось на фоне его быстрого подъема, и первые заметные переколебания были зарегистрированы приблизительно через 40 мин после начала вулканического дрожания и продолжились позднее. Это

время соответствует приходу атмосферной внутренней волны (ВГВ) на высоты F-слоя. Зарегистрированные периоды возмущений (порядка 30–40 мин) также соответствуют внутренним волнам. Источником этих волн могли стать как вулканическое дрожание (и сопутствующие ему процессы подъема магмы), начавшееся в 06:24 UT, так и пирокластический поток. Отметим, что приблизительно через 20 мин после начала вулканического дрожания прохождение атмосферных внутренних волн через нижнюю ионосферу проявилось как магнитные вариации на станции “Гальяно” (GLA; 37.71° с.ш., 14.57° в.д.) в 138 км от источника (см. рис. 16). Данные регистрации магнитных вариаций на станции “Гальяно” размещены на сайте Национального института геофизики и вулканологии Италии [<http://www.ct.ingv.it/>]. Распространение ВГВ в плазме нижней ионосферы, обуславливающее магнитные вариации на земной поверхности, рассмотрено в работе [Куницын, Шалимов, 2011].

Если использовать оценочную формулу для основного периода ВГВ $T = T_B (L/h)$, где T_B – период, соответствующий частоте Брента-Вьясяля, L – расстояние от источника до пункта регистрации сигнала, h – высота в ионосфере, то ожидаемый период вариаций на станции “Гальяно” (около 8 мин) отличается от зарегистрированного (15–25 мин). Отметим однако, что данная оценочная формула не учитывает влияние ветра на распространение ВГВ. При наличии ветра возникает доплеровский сдвиг, который может снижать частоту волны [Fritts, VanZandt, 1987]. Этот же эффект может

влиять и на снижение частот сигналов, регистрируемых в F-слое ионосферы в соответствии с наблюдениями.

Таким образом, в настоящей работе в ходе обработки и анализа результатов высотно-частотного зондирования на ионосферных станциях вблизи вулкана Стромболи сделан вывод о воздействии на ионосферу атмосферных акустико-гравитационных волн, генерируемых вулканической активностью и обуславливающих возникновение в ионосфере долгоживущих возмущений. Следует отметить, однако, что проведенный в работе анализ зарегистрированных в ионосфере сигналов АГВ позволяет сделать лишь предварительные выводы, поскольку для получения полной информации о структуре сигналов необходимо использовать данные более частотного режима зондирования ионосферы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Сбор и обработка экспериментальных данных, а также описание полученных при обработке данных 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 РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амосов О.С., Муллер Н.В. Применение методов вейвлет и фрактального анализа для математического и численного моделирования временных рядов // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 3. С. 122–124.
- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
- 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.
- 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.
- Обухов А.М. К вопросу о геострофическом ветре // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. 1949. Т. 13. № 4. С. 281–306.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
- Снивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. и др. Акустический, магнитный и электрические эффекты извержения вулкана Стромболи (Италия) в июле-августе 2019 г. // Физика Земли. 2020. № 5. С. 117–130.
- Снивак А.А., Рябова С.А. Магнитный и электрические эффекты взрывной стадии извержения вулкана Стромболи (03.07.2019 г., Италия) // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 54–57.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН, 2018. 390 с.
- Adhikari B., Khatriwada R., Chapagain N.P. Analysis of geomagnetic storms using wavelet transforms // Journal of Nepal Physical Society. 2017. V. 4. № 1. P. 119–124.
- Andronico D., Del Bello E., D’Orsiano C., Landi P., Pardini F., Scarlato P., de Micheli Vitturi M., Taddeucci J., Cristaldi A., Ciancitto F., Pennacchia F., Ricci T., Valentini F. Uncovering the eruptive patterns of the 2019 double paroxysm eruption crisis of Stromboli volcano // Nature Communications. 2021. V. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-24420-1
- 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. of Geophys. Res. Solid Earth. 2009. V. 114. № B02. DOI: 10.1029/2008JB005722
- Fritts D.C., VanZandt T.E. Effects of doppler shifting on the frequency spectra of atmospheric gravity waves // J. of Geophys. Res. Atmospheres. 1987. V. 92. № D8. P. 9723–9732.
- Giordano G., De Astis G. The summer 2019 basaltic Vulcanian eruptions (paroxysms) of Stromboli // Bull. of Volcanology. 2021. V. 83. DOI: 10.1007/s00445-020-0143-2
- 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.
- Mochalov V., Mochalova A. Extraction of ionosphere parameters in ionograms using deep learning // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. 2019. V. 127. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912701004>
- Riabova S.A. Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations // J. of Physics Conference. 2018. V. 1141(1). 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
- Scotto C. Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis // *Advances in Space Research*. 2009. V. 44. P. 756–766.
- Scotto C., Pezzopane M., Zolesi B. Estimating the vertical electron density profile from an ionogram: On the passage from true to virtual heights via the target function method // *Radio Science*. 2012. V. 47. RS1007. <https://doi.org/10.1029/2011RS004833>
- Torrence C., Compo G. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
- Wakai N., Ohyama H., Koizumi T. Manual of ionogram scaling / 3rd Eds. Japan: Radio Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, 1987. 119 p.

Ionospheric Perturbations after Stromboli Volcano Eruptions

S. A. Riabova^{1, 2, *}, S. L. Shalimov^{1, **}

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

²*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Leninsky prosp., 38, bld. 1, Moscow, 119334 Russia*

*e-mail: riabovasa@mail.ru

**e-mail: pmsk7@mail.ru

Based on data from ground-based vertical sounding of the ionosphere, we analyze disturbances in the region of the maximum of the ionospheric F2-layer during the period of a strong eruption of the Stromboli volcano (Italy) in the form of two explosions in July and August 2019, as well as after the resumption of volcanic activity on October 9, 2022. As characteristics of the ionospheric response to these events, we research variations in the critical frequency of the F2-layer at the Giebilmann, Rome, and San Vito stations located near (no further than 450 km) the volcano. The measurement results indicate the influence on the ionosphere of atmospheric acoustic-gravity waves generated by volcanic activity and causing the appearance of long-lived disturbances in the ionosphere.

Keywords: volcanic eruption, F2-layer critical frequency, wavelet analysis, paroxysm