

УДК 551.594

## АКУСТИЧЕСКИЙ, МАГНИТНЫЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА СТРОМБОЛИ (ИТАЛИЯ) В ИЮЛЕ–АВГУСТЕ 2019 г.

© 2020 г. А. А. Спивак<sup>1</sup>, \*, Ю. С. Рыбнов<sup>1</sup>, С. А. Рябова<sup>1</sup>,  
С. П. Соловьев<sup>1</sup>, В. А. Харламов<sup>1</sup>

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

\*E-mail: [aaspivak100@gmail.com](mailto:aaspivak100@gmail.com)

Поступила в редакцию 27.01.2019 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 23.04.2020 г.

Приведены результаты инструментальных наблюдений за акустическими колебаниями, геомагнитными вариациями и вариациями электрического поля и атмосферного тока в период активизации вулкана Стромболи (Италия) в 2019 г. Отдельно рассмотрены периоды эксплозивной активности и период, характеризующийся интенсивным истечением раскаленной пепло-газовой смеси. Показано, что вулканическая деятельность сопровождается генерацией акустического сигнала на эксплозивных стадиях извержения и внутренних гравитационных волн на стадии интенсивной “продувки”. Характерные вариации магнитного поля Земли и электрических параметров приземного слоя атмосферы наблюдаются в разные периоды извержения вулкана. Представленные результаты дополняют соответствующую базу данных и могут представлять интерес при совершенствовании известных и разработке новых моделей влияния вулканической деятельности на окружающую геофизическую среду и их верификации.

*Ключевые слова:* вулкан, извержение, эксплозия, продувка, акустический сигнал, геомагнитные вариации, вариации электрического поля.

DOI: 10.31857/S0002333720050129

### ВВЕДЕНИЕ

Вулканическая деятельность оказывает сильное воздействие на атмосферу Земли [Фирстов и др., 2019]. Возмущения атмосферы особенно ярко проявляются на эксплозивных стадиях извержения вулканов в периоды образования эруптивных облаков. Помимо сильного локального возмущения атмосферы в результате резкого выброса смеси газов и пирокластического материала, что приводит, в частности, к образованию воздушных волн [Адушкин и др., 1984; Адушкин, Фирстов, 2010], наблюдаются также атмосферно-электрические эффекты [Фирстов и др., 2019; Руленко, 1979; 1985; James et al., 2000; Johnston, 1997; Lane, Gilbert, 1992; Mather, Harrison, 2006]. В ряде случаев напряженность электрического поля в эруптивном облаке настолько велика, что в нем наблюдаются вулканические молнии [Фирстов и др., 2017]. Воздушные волны и электризация эруптивного облака определяют сложный характер воздействия вулканических извержений на среду. Здесь следует отметить, что извержение вулкана происходит не единовременно: процесс, как правило, характеризуется перемежающимися стади-

ями эксплозивных извержений и менее мощных, протяженных во времени, стадий квазистационарного истечения и выброса разогретой до значительных температур пепло-газовой смеси и пирокластического материала [Дегтерев, Чибисова, 2019].

Изучение вариаций физических полей, вызванных вулканами, вызывает особый интерес как с точки зрения расширения представлений и понимания механизмов процессов, сопровождающих вулканические извержения, так и оценки и прогнозирования их экологических последствий.

В настоящей работе на основе данных инструментальных наблюдений рассматриваются акустические эффекты, вариации геомагнитного поля и электрических параметров приземной атмосферы (напряженности электрического поля, атмосферного тока) в периоды первой и второй эксплозивных стадий, а также в период интенсивной “продувки” — наиболее мощной стадии истечения разогретого пирокластического материала при извержении вулкана Стромболи (Италия), которое произошло в летний период 2019 г.

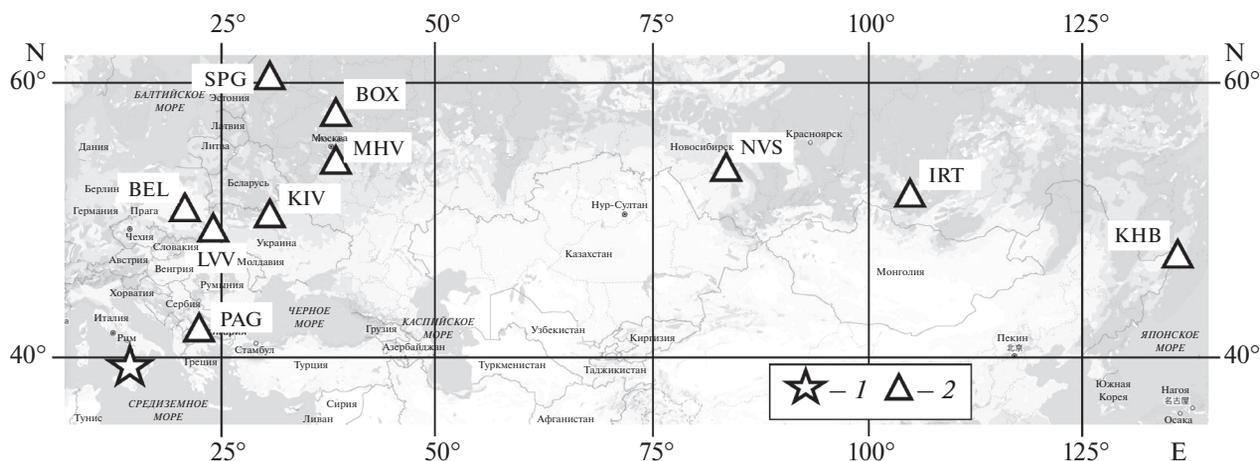


Рис. 1. Расположение пунктов магнитной регистрации (треугольники); звездочкой отмечено положение вулкана Стромболи.

Вулкан Стромболи, расположенный на одноименном острове в Тирренском море ( $38.786^{\circ}$  N;  $15.218^{\circ}$  E), активизировался по данным национального института геофизики и вулканологии Италии (INGV) 03.07.2019 г. примерно в 13:45 UT<sup>1</sup>. Активность проявилась в виде повышенного газовыделения на участке склона, расположенного в  $\sim 100$  м от кратера, после чего наблюдалось мощное проявление вулканической деятельности эксплозивного типа  $\sim 14:45$  UT в виде интенсивного выброса пирокластического материала из кратера и быстрого формирования эруптивного облака, а затем и эруптивной колонны<sup>2</sup>.

После первой эксплозивной стадии наблюдалось некоторое затишье, во время которого вплоть до  $\sim 20:00$  UT 05.07.2019 г. наблюдалось истечение пирокластического материала, изредка сопровождавшееся маломощными эксплозиями, и формировался лавовый поток. Активность вулканического извержения в виде “продувки” – выброса в атмосферу пепло-газовой смеси, возобновилась вечером 05.07.2019 г. и продолжалась до  $\sim 04:00$  UT 06.07.2019 г. При этом в  $\sim 2:00$  UT 06.07.2019 г. отмечалось наиболее сильное истечение в виде мощной вертикальной струи раскаленной пепло-газовой смеси [https://yandex.ru/video/preview?filmId=9168275947493259539&text=вулкан+Стромболи+извержение+видео/] с яркостной температурой, превышающей  $1000^{\circ}\text{C}$ . Смесь выбрасывалась на высоту нескольких километров, что привело к формированию в атмосфере значительной по размеру области, характеризующейся измененным составом и существенно повышенной температурой.

Вторая стадия эксплозивной активности извержения вулкана Стромболи началась по данным службы Гражданской обороны Италии 28.08.2019 г. примерно в 10:00 UT и проявилась несколькими слабыми эксплозиями. Наиболее сильные эксплозии наблюдались 29.08.2019 г. в  $\sim 20:45$  UT<sup>3</sup>, причем после основного вулканического взрыва в  $\sim 20:45$  UT с интервалами примерно 20 мин произошли еще два вулканических взрыва меньшей энергии, также сопровождавшиеся интенсивным выбросом пепла.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты инструментальных наблюдений за геофизическими эффектами, сопровождавшими извержение вулкана Стромболи, в виде акустических сигналов, вариаций магнитного поля и электрических характеристик приземного слоя атмосферы.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении исследований использовались в основном данные, полученные в результате наблюдений за геофизическими полями в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНВ) с координатами:  $54.4^{\circ}$  N;  $37.73^{\circ}$  E и в Центре геофизического мониторинга г.Москвы (ЦГМ) ИДГ РАН с координатами:  $55.71^{\circ}$  N;  $37.57^{\circ}$  E, расстояние между которыми составляет  $\sim 85$  км (рис. 1) [Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2016].

Регистрация атмосферного давления и других метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы, выполнялась в МНВ и ЦГМ с помощью автоматизированных цифровых метеостанций Davis Vantage Pro 2. Микробарические вариации регистрировались с помощью микробаро-

<sup>1</sup> https://geocenter.info/new/izverzhenie-vulkana-stromboli-ijul

<sup>2</sup> https://www.volcanodiscovery.com/stromboli/eruptions/3july2019-explosion.html

<sup>3</sup> https://ria.ru/20190830/1558059711.html

**Таблица 1.** Пункты геомагнитных наблюдений

Наименование пункта наблюдения	Международный код станции	Широта, град	Долгота, град	Расстояние $R$ , км
Бельск (Польша)	BEL	51.84	20.79	~1514
Борок (Россия)	BOX	58.07	38.23	~2707
Иркутск (Россия)	IRT	52.27	104.45	~6659
Киев (Украина)	KIV	50.72	30.3	~1776
Львов (Украина)	LVV	49.9	23.75	~1408
Михнево* (Россия)	MHV	54.94	37.73	~2460
Новосибирск (Россия)	NVS	54.85	83.23	~5242
Панагюриште (Болгария)	PAG	42.50	83.23	~863
С.- Петербург (Россия)	SPG	60.54	29.72	~2620
Хабаровск (Россия)	KHB	47.61	134.69	~8697

Примечание: звездочкой обозначена магнитная обсерватория, не входящая в сеть ИНТЕРМАГНЕТ.

**Таблица 2.**  $K$ -индекс магнитной активности в периоды основных стадий извержения вулкана Стромболи по данным MHV

Дата	Время (UT)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
03.07.2019	0	0	1	2	1	2	1	0
06.07.2019	1	1	2	1	1	0	0	0
29.08.2019	0	0	0	1	2	2	1	1

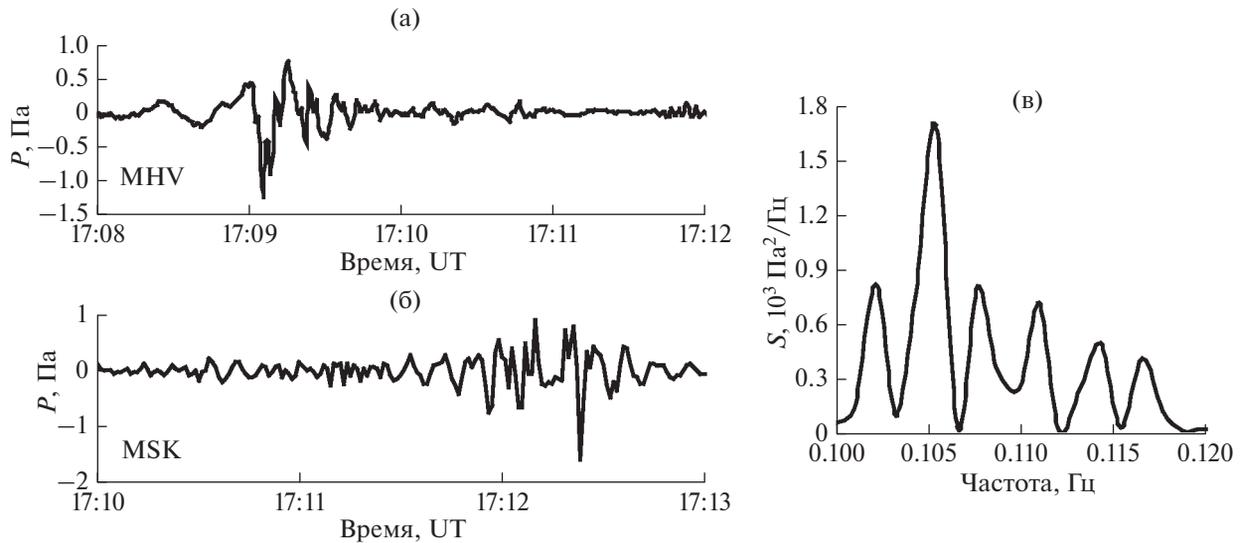
метра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц. Поиск акустических сигналов, вызванных извержением вулкана, выполнялся на основе анализа исходной записи в диапазоне частот 0.005–1 Гц с учетом расстояния до источника сигнала (~2450 км) и вероятной скорости его распространения в стратосферном волноводе (280–310 м/с) [Куличков и др., 2004]. Регистрация в двух пунктах (MHV и ЦГМ) позволяла не только оценивать скорость распространения сигнала, но и осуществлять пеленг на источник.

Измерение компонент индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ <sup>4</sup> выполнялось с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне ±68000 нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с<sup>-1</sup>). При анализе магнитного эффекта, вызванного извержением вулкана Стромболи, привлекались также данные регистрации трех компонент магнитного поля ряда обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ (рис. 1), расположенных на разных расстояниях от вулкана  $R$  в средних широтах (табл. 1).

<sup>4</sup> Направление осей координат:  $x$  – С–Ю,  $y$  – В–З,  $z$  – вертикально вниз.

При описании электрических возмущений приземного слоя атмосферы использовались результаты непрерывной регистрации вертикальных компонент атмосферного электрического поля  $E$  и атмосферного тока  $I$  в MHV, а также вертикальной компоненты атмосферного электрического поля  $E$  в ЦГМ. Измерения напряженности электрического поля и атмосферного тока осуществлялись соответственно с помощью электростатического флюксметра ИНЭП [Адушкин и др., 2018] в диапазоне частот 0–20 Гц и компенсационного регистратора тока [Барышев и др., 2009] с частотой выборки 1 с<sup>-1</sup>. Для анализа  $E$  использовались ряды цифровых записей, сформированные с дискретностью 5 с. В связи с высокой вариабельностью атмосферного тока  $I$  для выделения вызванных вариаций анализировались среднеквадратичные отклонения  $I_0$  с усреднением по одноминутному интервалу.

Обрабатывались данные, полученные при отмеченных выше стадиях извержений вулкана Стромболи 03.07.2019, 06.07.2019 и 29.08.2019 гг. Следует отметить, что периоды времени, в которые наблюдались основные стадии вулканической деятельности Стромболи, характеризуются низкой магнитной активностью (табл. 2), а также отсутствием значимых возмущений электрического поля от природных и техногенных источни-



**Рис. 2.** Микробарические пульсации в полосе частот 0.05–0.5 Гц, вызванные эксплозией вулкана Стромболи 03.07.2019 г. по данным МНУ (а) и ЦГМ (б); зависимость спектральной плотности вызванного акустического сигнала в ЦГМ от частоты (в).

ков в МНУ, что значительно упростило анализ влияния вулканической деятельности в эти периоды на физические поля.

## АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА СТРОМБОЛИ

### Акустический сигнал при эруптивном извержении 03.07.2019 г.

Мощные воздействия на атмосферу, которые оказывают вулканические извержения особенно эруптивного типа, возбуждают колебания атмосферного давления в широком диапазоне частот, вызывая в ряде случаев ударные волны [Фирстов и др., 1978]. Наряду с аэродинамическим шумом (диапазон частот  $f \approx 20\text{--}1000$  Гц), акустическими возмущениями импульсного типа ( $f \approx 1\text{--}10$  Гц) и длиннопериодными колебаниями ( $f < 0.003$  Гц) извержения вулканов вызывают инфразвуковые волны в диапазоне частот 0.003–1 Гц, которые в силу слабого затухания распространяются на значительные расстояния от источника [Адушкин и др., 1984; Firstov, 1994; 1996; Murayama, 1969; Reed, 1980; Stewart, 1959].

С целью выделения вызванного вулканическим взрывом акустического сигнала осуществлялась полосовая фильтрация первичной цифровой записи в диапазоне частот 0.05–1 Гц. Полученные формы сигнала приведены на рис. 2а, 2б. Из рис. 2 следует, что приход сигнала в МНУ и ЦГМ зарегистрировано соответственно в ~17:09 и 17:11 UT. Длительность сигналов составила ~3–4 мин. Зависимость спектральной плотности колебаний от частоты демонстрирует рис. 2в. При этом следует

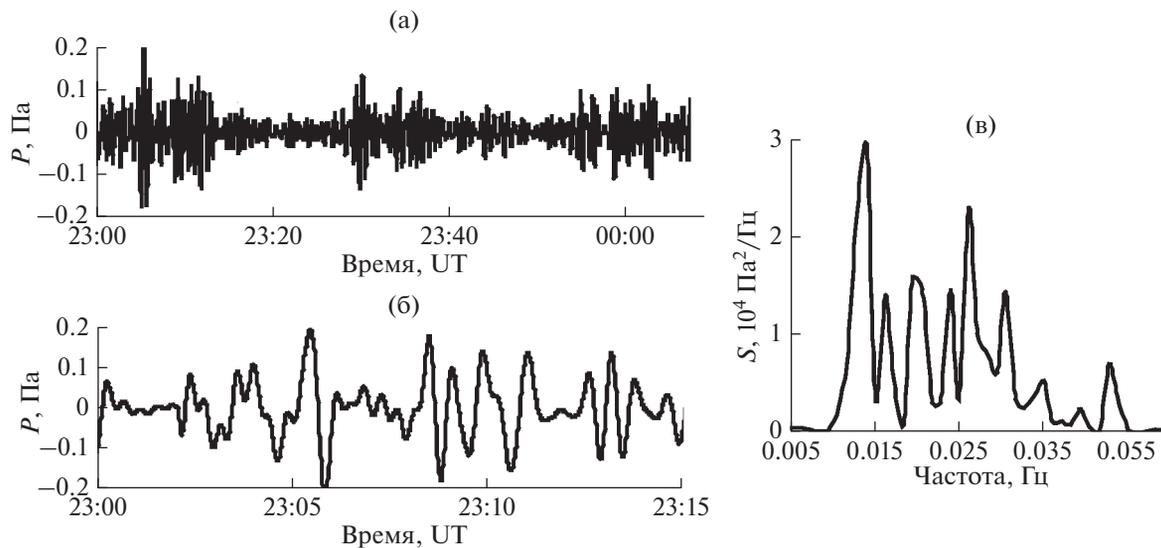
отметить, что наличие нескольких близко расположенных спектральных максимумов является характерной особенностью в данном случае инфразвукового сигнала, вызванного вулканической эксплозией [Сторчеус и др., 2006].

### Акустический сигнал, вызванный вулканическими взрывами 29.08.2019 г.

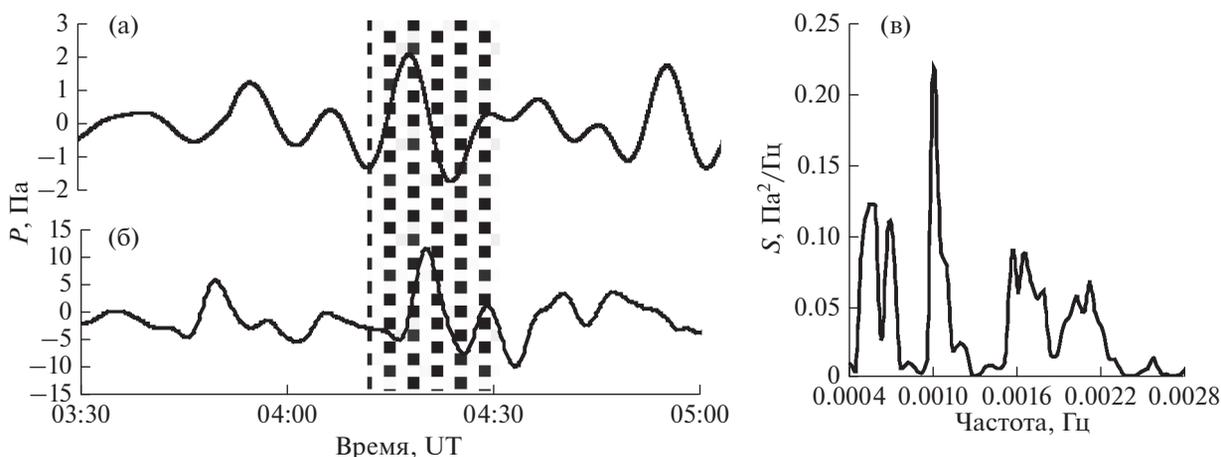
Акустический сигнал, вызванный повторным извержением Стромболи эксплозивного характера, приведен на рис. 3а. Приход сигнала зарегистрирован в ~23:03 UT. На записи отчетливо видны сигналы, вызванные основным и двумя последующими вулканическими взрывами, которые произошли с интервалом ~25 мин. В качестве иллюстрации на рис. 3б приведена более детально форма сигнала от первой наиболее мощной эксплозии. Характер спектра, зарегистрированного в ЦГМ сигнала, демонстрирует рис. 3в. При этом следует отметить, что формы спектров акустических сигналов от эксплозий 03.07.2019 и 29.08.2019 гг. являются сходными при том, что основной вклад в спектральную мощность наблюдается в существенно разных частотных диапазонах.

### Воздушная волна на стадии “продувки” – высокоинтенсивного квазистационарного извержения вулкана “Стромболи”

Специфика этой стадии извержения заключается в отсутствии эксплозий. Активность вулкана проявилась в виде внезапного вертикального потока сильно нагретого вещества, светящийся столб которого поднялся на высоту первых сотен



**Рис. 3.** Микробарические пульсации в полосе частот 0.01–0.04 Гц, вызванные эксплозией вулкана Стромболи 29.08.2019 г. по данным ЦГМ (а) и его фрагмент (б); зависимость спектральной плотности вызванного акустического сигнала от частоты (в).

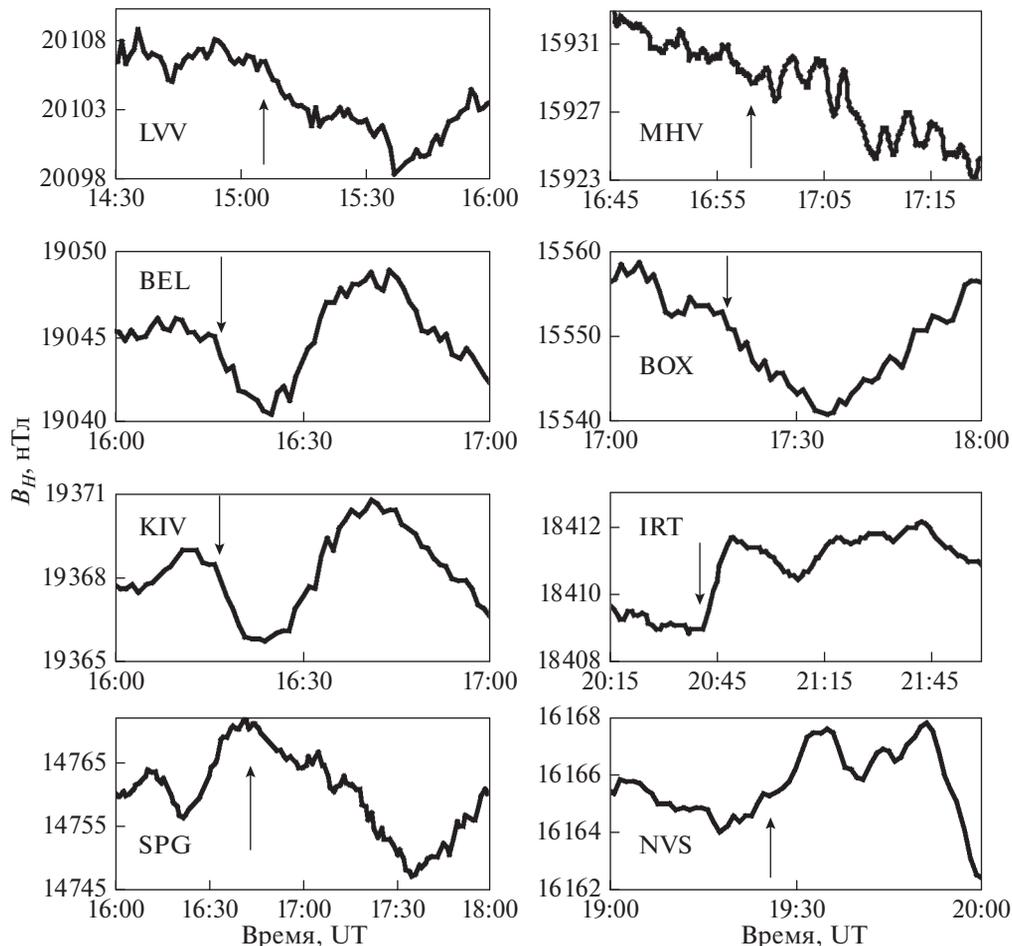


**Рис. 4.** Микробарические пульсации в полосе частот 0.0005–0.05 Гц в период интенсивной продувки вулкана Стромболи 06.07.2019 г. по данным МНУ (а) и ЦГМ (б); зависимость спектральной плотности вызванного акустического сигнала в ЦГМ от частоты (в); заливкой показан период аномальных микробарических вариаций.

метров. В результате в течение первых десятков минут над кратером сформировалась область достаточно большого размера с избыточной температурой. Известно, что наличие динамически сформировавшейся области с высокой температурой является причиной генерации инфразвуковых и внутренних гравитационных волн [Gossard, Hook, 1975]<sup>5</sup>. Особенно ярко это проявляется при

крупномасштабных взрывах и сильных пожарах [Гостинцев и др., 1983; 1985; Гостинцев, Шацких, 1987]. Результаты регистрации воздушных волн, вызванных интенсивной “продувкой” [Сторчеус и др., 2006] вулкана Стромболи, приведены на рис. 4а, 4б. Основные микробарические вариации, связанные с приходом сигнала зарегистрированы в период ~04:20–04:30 UT. Данные рис. 4а, 4б показывают, что в отличие от эксплозивных стадий извержения в результате интенсивной “продувки” генерируются преимущественно внутренние воздушные волны (ВГВ) в диапазоне ~0.0005–0.003 Гц, что хорошо подтверждают спектральные оценки (рис. 4в). Возмущения в диапазоне ВГВ обусловлены в данном случае формированием мощной

<sup>5</sup> Колебания с периодами 6–15 мин отождествляются с основной модой ВГВ на высоте зависания конвективной области продуктов нагрева над очагом, т.е. колебаниями около уровня теплового равновесия. Такой механизм генерации ВГВ проникающей конвекцией наблюдается при наличии сильно неустойчивого (перегретого) слоя атмосферы [Gossard, Hook, 1975]



**Рис. 5.** Геомагнитные вариации в периоды прихода акустического сигнала, вызванного эксплозией 03.07.2019 г. по данным разных обсерваторий (здесь и на последующих рисунках вертикальными стрелками указаны времена прихода акустического сигнала).

эруптивной колонны, достигающей по некоторым оценкам тропопаузы [Фирстов, 1997].

Следует отметить, что согласно оценкам, выполненным с учетом времен прихода акустического сигнала в пункт регистрации, скорость его распространения в атмосферном волноводе составляет во всех случаях величину в диапазоне 290–310 м/с.

### ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что в период вулканической деятельности наблюдаются повышенные вариации магнитного поля Земли [Johnston, 1997]. Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что аномальные геомагнитные вариации наблюдаются не только в период эксплозий, но также в период прихода акустического сигнала в точку регистрации. На рис. 5 приведены геомагнит-

ные вариации в периоды прихода акустического сигнала, вызванного эксплозией 03.07.2019 г., на разные обсерватории (скорость распространения сигнала в термосферном волноводе (либо в ионосфере [Куницын, Шалимов, 2011]), оцененная по магнитным записям с учетом расстояния до источника, составляет величину ~295–305 м/с). Значения зарегистрированных в этом случае амплитуд вызванных геомагнитных вариаций приведены в табл. 3.

Отклик магнитного поля на приход акустического сигнала, вызванного вулканической эксплозией 29.08.2019 г., приведен на рис. 6, который также демонстрирует наличие аномальных геомагнитных вариаций в период прихода акустического сигнала, скорость распространения которого в термосферном волноводе, оцененная по магнитным записям с учетом расстояния до источника, составляет в данном случае величину ~290–310 м/с (на удаленных пунктах регистрации NVS, IRT и КНВ эффект не проявился).

**Таблица 3.** Максимальная амплитуда вариаций  $B_H$  на разных стадиях извержения вулкана Стромболи

Дата	Обсерватория, расстояние $R$ (км)									
	PAG, 863	LVV, 1408	BEL, 1514	KIV, 1776	MHV, 2460	SPG, 2620	BOX, 2707	NVS, 5242	IRT, 6659	KHB, 8697
03.07.2019	—	7.4	4.3	2.8	2.5	16	12	3.2	2.6	—
06.07.2019	1.4	1.4	2.6	~1	5.4	5.3	5.1	—	—	—
30.08.2019	2.5	1.5	3.1	—	2.1	—	1.4	—	—	—

В дополнение следует отметить, что, как и в случаях эксплозий 03.07.2019 и 29.08.2019 гг., акустический сигнал, сформировавшийся в результате интенсивной продувки вулкана, вызвал достаточно хорошо проявившиеся на магнитных записях вариации  $B_H$  (рис. 7) амплитудой ~1–5.5 нТл (табл. 3).

**ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА СТРОМБОЛИ**

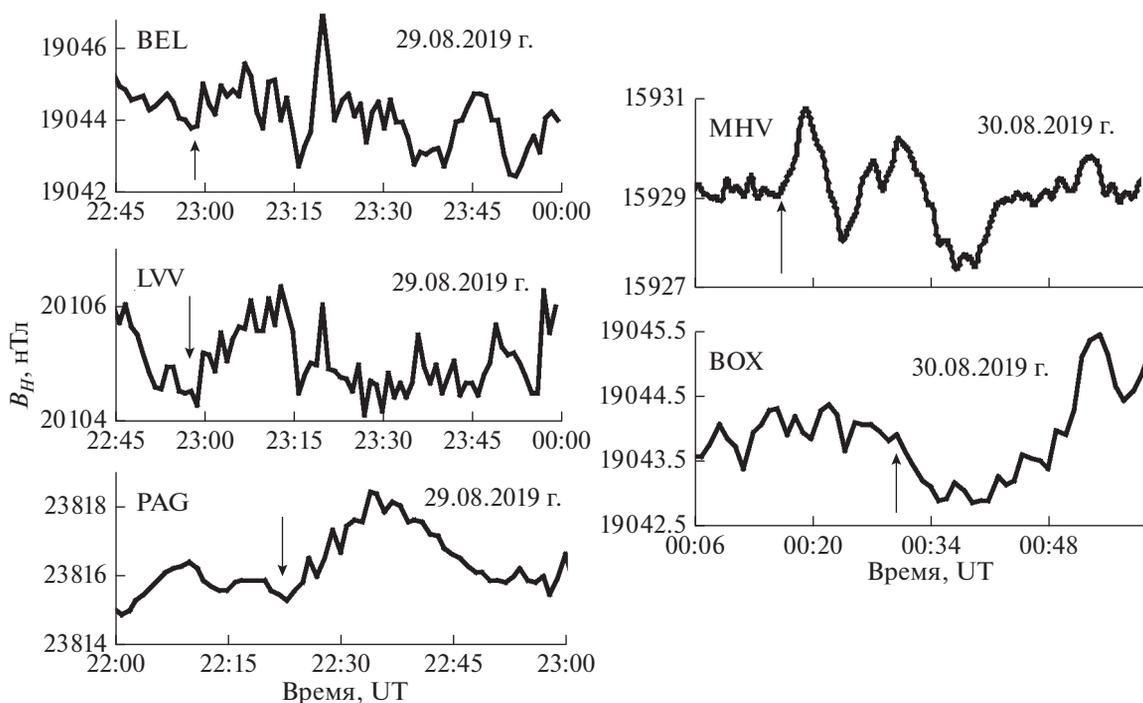
**Напряженность электрического поля атмосферы**

Вулканический взрыв 03.07.2019 г. практически сразу вызвал изменение в ходе зависимости  $E$  от времени  $t$  в MHV — обсерватории, расположенной на значительном расстоянии от “Стромболи”. На рис. 8а приведены результаты регистрации вертикальной компоненты электрического поля в MHV, полученные в период эксплозивной стадии

извержения вулкана 03.07.2019 г. Данные рис. 8а свидетельствуют о том, что в период 13:40–13:45 UT было зарегистрировано возникновение хорошо выраженных аномальных вариаций  $E(t)$  в виде периодических пульсаций с периодом ~45 мин и средней амплитудой ~35 В/м.

В период вулканического взрыва 29.08.2019 г. отклик электрического поля также проявился в виде повышенных периодических вариаций  $E(t)$  в MHV и более выраженных вариаций  $E(t)$  в ЦГМ (рис. 9а, 9б).

Аномальные вариации электрического поля регистрировались также в период прихода акустического сигнала, вызванного эксплозиями вулкана. Рисунок 8б демонстрирует вариации  $E$ , вызванные приходом акустического сигнала, вызванного эксплозией 03.07.2019 г., в MHV, а рис. 9в, 9г — вариации  $E$ , вызванные приходом акустического сигнала 30.08.2019 г. от эксплозии 29.08.2019 г. и за-



**Рис. 6.** Геомагнитные вариации в периоды прихода акустического сигнала, вызванного эксплозией 29.08.2019 г. по данным разных обсерваторий.

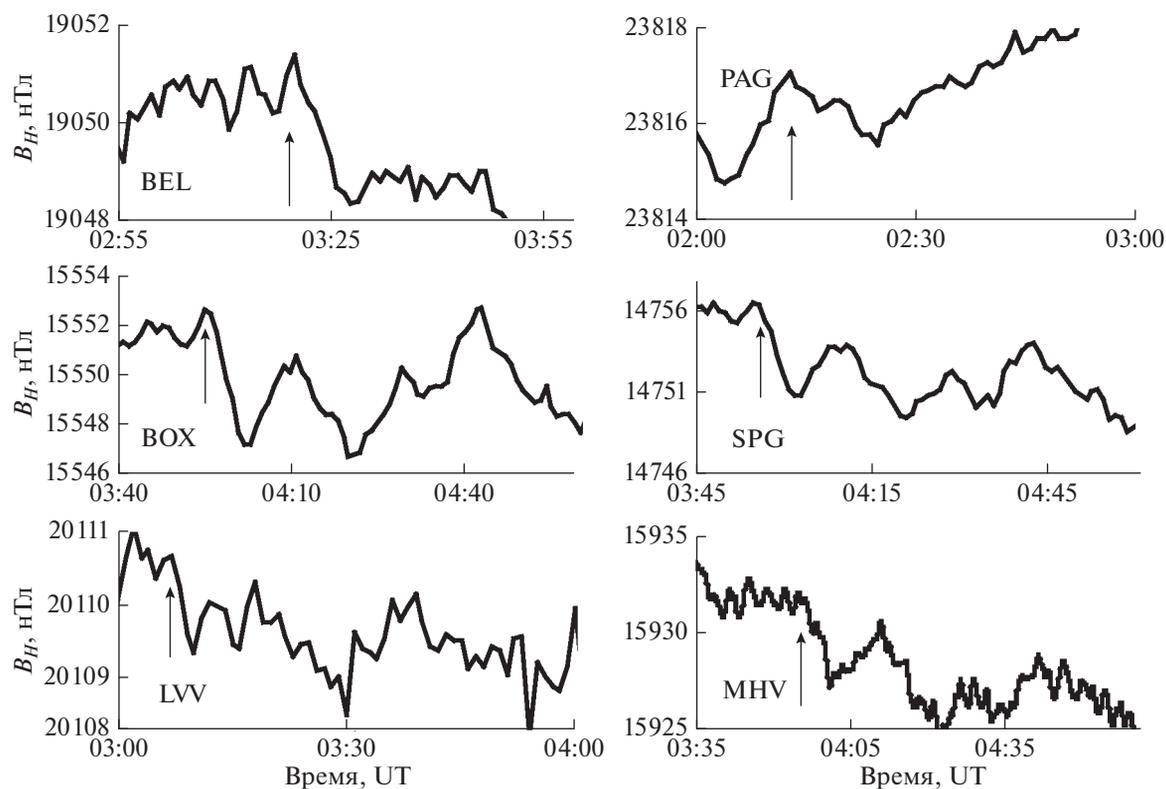


Рис. 7. Геомагнитные вариации в периоды прихода акустического сигнала, вызванного интенсивной продувкой вулкана Стромболи 06.07.2019 г. по данным разных обсерваторий.

регистрированные соответственно в МНУ и ЦГМ. Видно, что и в том и другом случае акустическому возмущению сопутствуют повышенные знакопеременные вариации  $E$ .

Вариации электрического поля в период продувки вулкана Стромболи 06.07.2019 г. имеют в МНУ и в ЦГМ характерный вид, представленный на рис. 10а, 10б. Интенсивный прогрев атмосферы вызвал бухтообразную отрицательную вариацию  $E$  амплитудой  $\sim 55$  В/м. Следует отметить, что морфология вариаций  $E$  в данном случае близка морфологии воздушной волны, которая наблюдалась при извержении вулкана Безымянный (Камчатка) 30.03.1956 г. [Пасечник, 1958].

Приход ВГВ, сформировавшихся при интенсивной продувке вулкана, вызвал в МНУ и ЦГМ бухтообразное уменьшение электрического поля, осложненное знакопеременными вариациями  $E$  (рис. 9в, 9г). В целом амплитуда изменения  $E$  в этом случае составила  $\sim 25$  В/м.

#### Вертикальный атмосферный ток

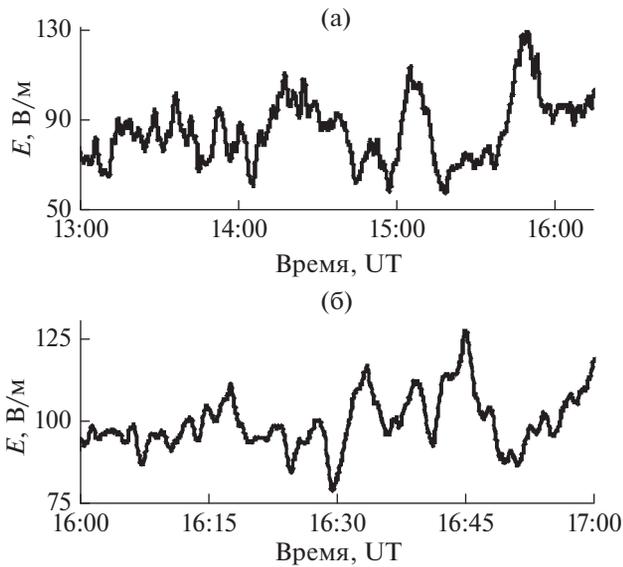
Результаты измерений свидетельствуют о достаточно сильной реакции атмосферного тока на вулканическое извержение. На рис. 11 приведены вариации вертикальной компоненты атмосфер-

ного тока в виде среднеквадратичного отклонения  $I_0$  во время первой эксплозивной стадии извержения Стромболи 03.07.2019 г. (рис. 11а) и во время прихода в МНУ акустического сигнала, вызванного эксплозией (рис. 11б). Рисунки наглядно демонстрируют, и в том, и другом случае значительное увеличение  $I_0$ . Аналогичные вариации атмосферного тока зарегистрированы во время интенсивной продувки вулкана 06.07.2019 г. и в период прихода вызванных продувкой вулкана ВГВ (рис. 12).

Более сложным образом выглядит отклик атмосферного тока на вторую эксплозивную стадию извержения Стромболи 29.08.2019 г. (рис. 13). В этом случае как в период эксплозий, так и в период прихода вызванного ими акустического сигнала наблюдаются знакопеременные вариации  $I_0$  с амплитудой, примерно в 2–2.5 раза превышающей амплитуду фоновых вариаций.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные выше результаты исследований свидетельствуют о наличии хорошо выраженного геофизического эффекта при извержении вулкана на всех его стадиях. При этом важно, что эффект наблюдается в физических полях разной



**Рис. 8.** Вариации вертикальной компоненты электрического поля в период эксплозии вулкана Стромболи 03.07.2019 г. (а) и в период прихода вызванного эксплозией акустического сигнала (б) по данным МНУ.

природы и на значительном удалении от источника возмущений. Это позволяет использовать данные инструментальных наблюдений не только для разработки моделей, описывающих активность конкретных вулканов, но также для описания поведе-

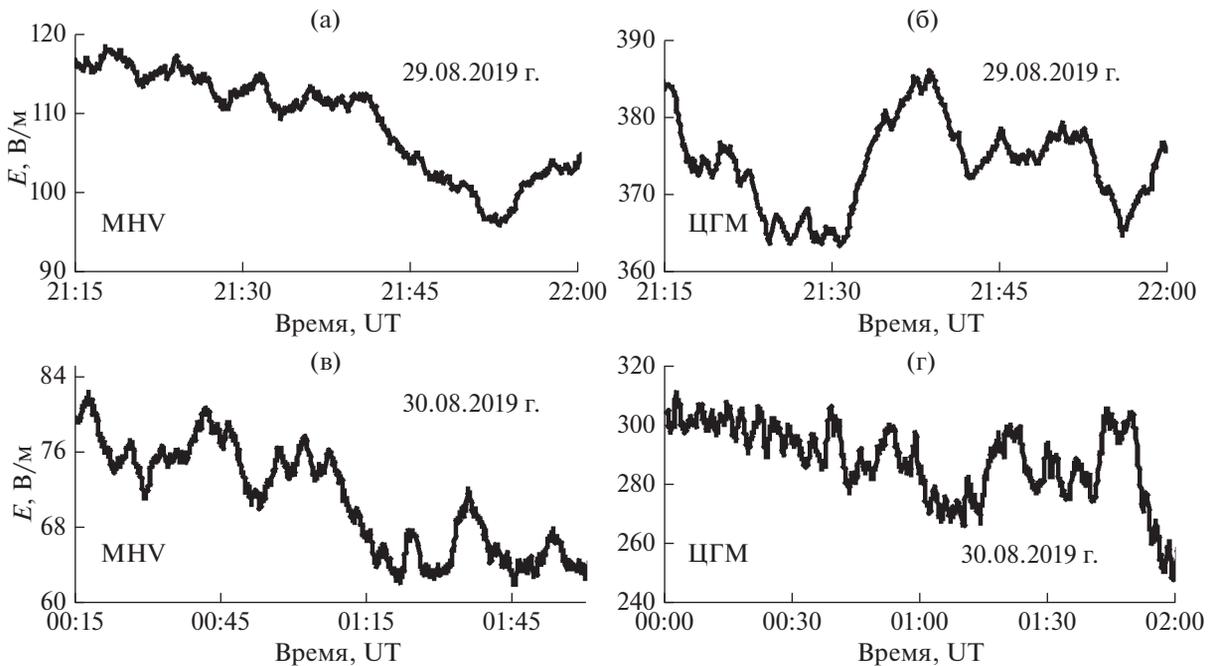
ния геофизической среды при внешних сильных воздействиях.

Порождаемая эксплозивной стадией извержения вулкана воздушная волна содержит информацию об уровне энерговыделения в источнике. Действительно, имеющиеся данные [Куличков, Буш, 2001; Адушкин и др., 2019] показывают, что в качестве основного параметра акустического сигнала при оценках полной энергии источника  $W$  следует рассматривать его характерную частоту  $f_0$ , поскольку амплитуда сигнала сильно зависит от расстояния и, главное, трассы распространения. В настоящей работе для оценки  $W$  на эксплозивных стадиях извержения и стадии продувки Стромболи воспользуемся зависимостью, предложенной в работе [Адушкин и др., 2019]:

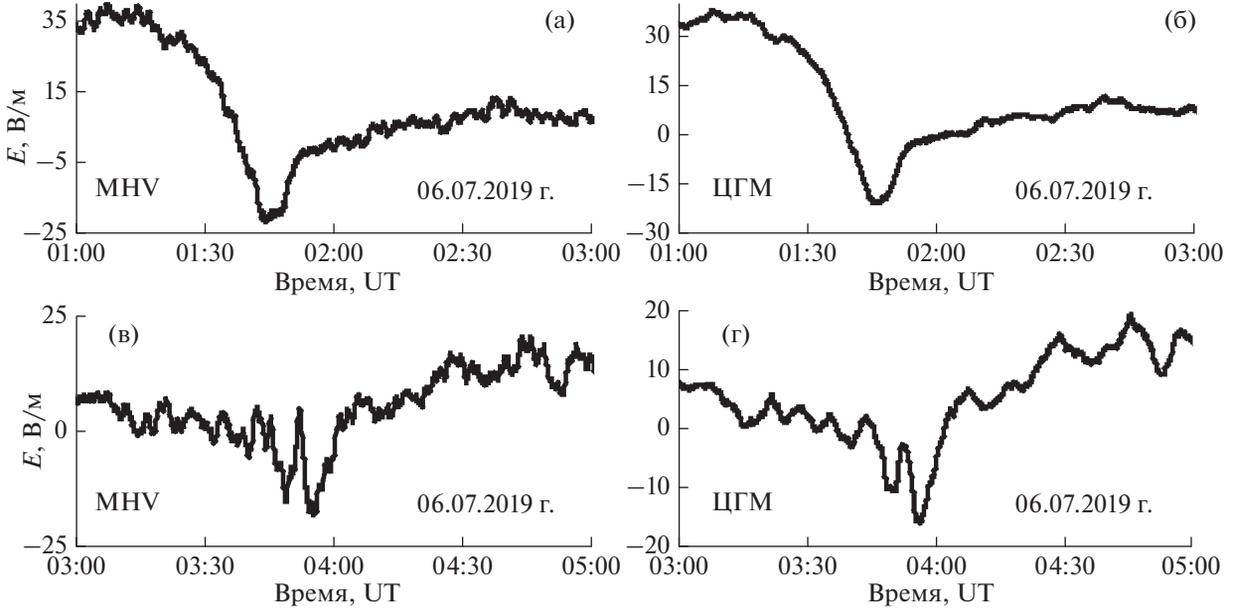
$$W \approx \frac{9.24 \times 10^{10}}{f_0^{2.2}} \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $f_0$  измеряется в Гц.

Здесь необходимо отметить, что при оценке энергии источника воздушных волн, генерируемых вулканом на стадии интенсивной продувки, имеется в виду энергия, выделившаяся в течение времени наиболее интенсивного истечения продуктов. При этом на этой стадии вулканической активности в качестве наиболее вероятного механизма генерации ВГВ допустимо рассматривать последовательное взаимодействие всплывающих нагретых областей некоторого характерного раз-



**Рис. 9.** Вариации вертикальной компоненты электрического поля в МНУ (а) и ЦГМ (б) в период эксплозии вулкана Стромболи 29.08.2019 г. и в период прихода вызванного эксплозией акустического сигнала 30.08.2019 г. по данным МНУ (в) и ЦГМ (г).

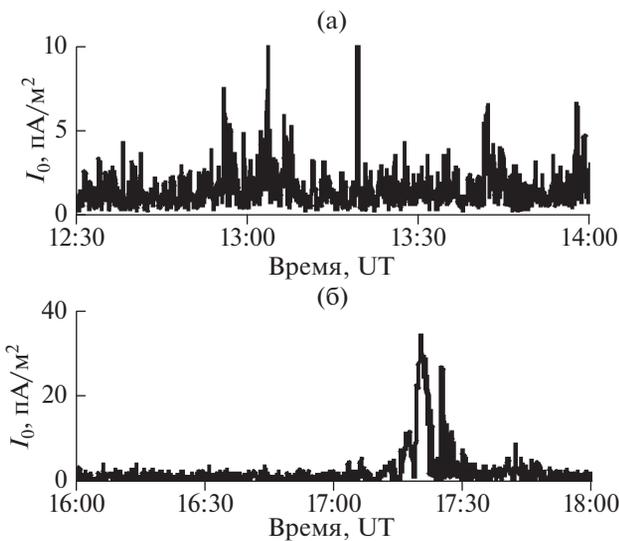


**Рис. 10.** Вариации вертикальной компоненты электрического поля в период интенсивной продувки вулкана Стромболи 06.07.2019 г. по данным МНВ (а) и ЦГМ (б), а также в период прихода акустического сигнала (в), (г) по данным МНВ и ЦГМ.

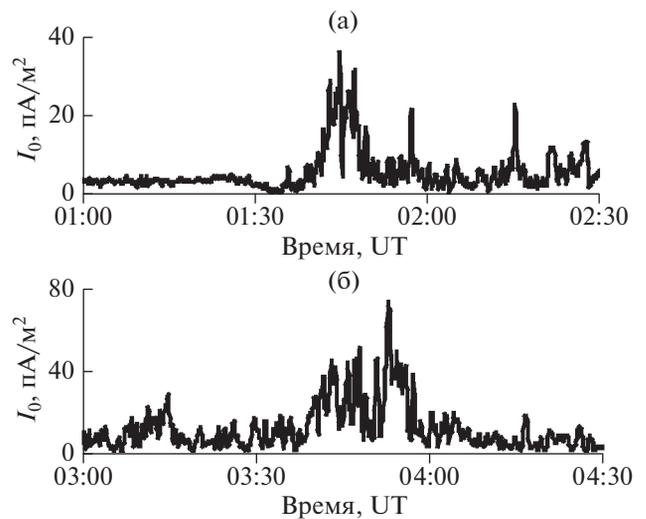
мера  $r_0$  [Заславский, Юрьев, 1999; Gossard, Hook, 1975].

Результаты оценок  $W$ , выполненные с учетом спектральных характеристик зарегистрированных акустических сигналов (рис. 2–рис. 4), приведены в табл. 4.

Рассматривая стадию интенсивной продувки вулкана, оценим динамику нагретой области атмосферы, оставаясь в рамках известных задач термо- и гидродинамики [Гостинцев, Шацких, 1987; Зецер и др., 2012; Сторчеус и др., 2006; Фирстов и др., 1987]. Поскольку приращение теплоты единичной массы газа составляет



**Рис. 11.** Среднеквадратичное отклонение вертикальной компоненты атмосферного тока в период эксплозии вулкана Стромболи 03.07.2019 г. (а) и прихода вызванного акустического сигнала (б) по данным МНВ.



**Рис. 12.** Среднеквадратичное отклонение вертикальной компоненты атмосферного тока в период интенсивной продувки вулкана Стромболи 06.07.2019 г. (а) и прихода вызванного акустического сигнала (б) по данным МНВ.

$$\Delta Q = T_0 \Delta S,$$

где:  $\Delta S$  – изменение удельной энтропии;  $T_0$  – начальная температура газа на высоте возмущения  $z$ , получаем с использованием результатов работы [Орлов, Уралов, 1984] выражение для изменения температуры газа  $\Delta T$ :

$$\frac{\Delta T}{T_0} \cong \frac{(\gamma^2 - 1)}{12} \left(\frac{u}{C}\right)^3,$$

где:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ;  $C$  – скорость звука на высоте  $z$ ;  $u$  – скорость спутного потока газа, составляющая примерно 500 м/с [Фирстов и др., 1987].

Оценка величины возможного смещения нагретой области в вертикальном направлении (вдоль оси  $z$ ) дает [Орлов, Уралов, 1984]:

$$z_0 \approx \frac{g}{(\omega_*)^2} \frac{1}{\gamma - 1} \frac{\Delta T}{T_0} \approx \frac{1}{5} \frac{g}{\omega_*^2} \left(\frac{u}{C}\right)^3, \quad (2)$$

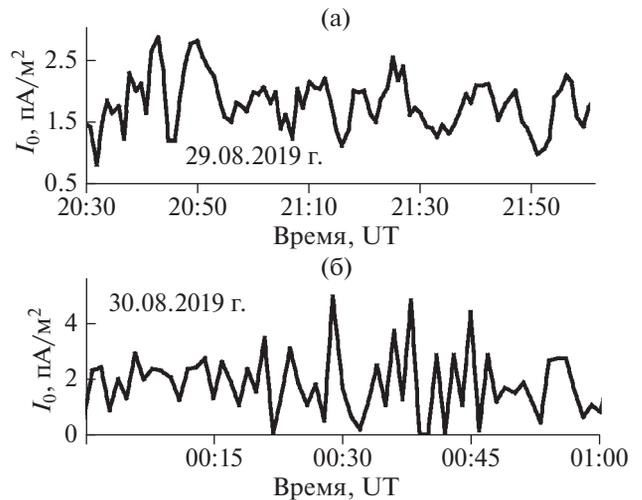
где  $\omega_*$  – частота Брента–Вайсяля.

С учетом неопределенности  $T_0$  оценки, выполненные с использованием зависимости (2), дают:  $z_0 \approx 12$ –15 км.

При устойчивой стратификации атмосферы нагретая область после достижения максимальной высоты начинает колебаться около уровня теплового равновесия с затухающей амплитудой. Вследствие турбулентного характера структуры всплывающей области происходит вовлечение в движение окружающих воздушных масс. Интенсивность вовлечения пропорциональна произведению вертикальной скорости подъема области на значение ее текущей поверхности с эмпирическим коэффициентом захвата  $\alpha$ .

Система уравнений, описывающих движение нагретой области имеет вид [Гостинцев и др., 1985]:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= u; \quad \frac{du}{dt} = \frac{\rho_0 - \rho_z}{\rho_z} g - \frac{3\rho_0 K}{8\rho_z r_0} \frac{dz}{dt}, \\ \frac{dM}{dt} &= 4\pi\alpha\rho_0 r_0^2 \frac{dz}{dt}; \quad \frac{dF}{dt} = -\omega_*^2 r_0^3 \frac{dz}{dt}, \end{aligned} \quad (3)$$



**Рис. 13.** Среднеквадратичное отклонение вертикальной компоненты атмосферного тока в период эксплозии вулкана Стромболи 29.08.2019 г. (а) и прихода вызванного акустического сигнала 30.08.2019 г. (б) по данным MNV.

где:  $r_0$  – эффективный размер нагретой области;

$M = \frac{4}{3} \pi \rho_0 r_0^3$  – масса заключенного в ней газа;  $\rho_0$  и  $\rho_z$  – соответственно начальная плотность газа и

на высоте  $z$ ;  $F = \frac{4}{3} \pi g r_0^3 \frac{T_0 - T_z}{T_z}$  – запас плавучести;

$K = K_F + 8\alpha$  – эффективный коэффициент сопротивления;  $K_F$  – коэффициент сопротивления формы (согласно данным работы [Гостинцев, Шацких, 1987]  $\alpha \approx 0.1$ ;  $K_F \approx 0.5$ ).

Система уравнений (3) дополняется условием состояния газа, которое в конвективном приближении имеет вид:

$$\frac{\rho_0 - \rho_z}{\rho_z} = \frac{T_0 - T_z}{T_z}. \quad (4)$$

Оценочные расчеты, выполненные по (3) и (4), свидетельствуют о том, что движение нагретой области имеет вид колебаний, причем в нашем случае их период составляет 12–17 мин, а ам-

**Таблица 4.** Энергия, высвободившаяся на разных стадиях извержения вулкана Стромболи

Дата	Стадия извержения	$f_0$ , Гц	$W$ , Дж
03.07.2019 г.	Эксплозия	0.105	$\sim 1.3 \times 10^{13}$
06.07.2019 г.	Продувка	0.001	$\sim 3.7 \times 10^{17}$
29.08.2019 г.	Эксплозия	0.0145	$\sim 1.1 \times 10^{15}$

плитуда 2200–2800 м. Как результат – генерация ВГВ. Следует отметить, что полученные оценки хорошо согласуются с результатами наблюдений, приведенными выше.

Механизм влияния вулканических извержений на магнитное и электрическое поле Земли в настоящее время до конца не ясен. Если локальные эффекты можно отнести за счет интенсивного выброса сильно разогретого материала в атмосферу, то установленное в настоящей работе близкое по времени “дальнейшее” вулканическое извержения требует проведения дальнейших более детальных исследований. Не исключается, что на стадиях интенсивных возмущений (эксплозии, сильная “продувка”) в результате быстрого образования эруптивной колонны или мощного весьма протяженного по вертикали потока горячей сильно ионизированной пепло-газовой смеси происходит формирование в приповерхностной зоне Земли источника сильного акустического и электрического воздействия на ионосферу. В результате возникшее в ионосфере в эпицентре такого источника магнитогидродинамическое возмущение распространяется по ионосфере с высокой скоростью (~22 км/с [Сорокин, Федорович, 1982]), что приводит (с учетом точности установления времени начала вызванных вариаций) к близким по времени вариациям электрического поля на разных расстояниях от источника. В качестве одного из альтернативных механизмов допустимо рассматривать, например, процесс конвертирования акустического возмущения в магнито-звуковую волну [Ковалева и др., 2013].

С учетом наблюдаемого отклика геомагнитного и электрического полей на приход акустического сигнала можно предполагать, что порождаемые деятельностью вулкана воздушные волны являются также причиной возмущения магнитного и электрического поля, например, в результате формирования аэроэлектрических структур в приземном слое атмосферы, либо, что более вероятно, при посредничестве ионосферы.

Вопросы, связанные с возможными механизмами и моделями влияния вулканического извержения на геофизические поля, которые описывают все стороны процесса, требуют отдельного внимания и проведения дополнительных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о сложности геофизических процессов, сопутствующих активной вулканической деятельности. Полученные данные свидетельствуют о том, что наряду с известными локальными эффектами, сопутствующими сильной вулканической активности (выброс нагретого материала,

формирование воздушной волны и потока лавы, возмущение локального электрического поля приземной атмосферы, и т.д.) регистрируется возмущение физических полей на значительных расстояниях от вулкана. При этом важно отметить, что вариации, например, электрических характеристик атмосферы наблюдаются не только в период вулканического извержения на разных его стадиях, но и в периоды возмущения атмосферы пришедшим в точку регистрации акустическим сигналом, вызванным вулканической активностью.

Представить ясную физическую интерпретацию рассмотренных эффектов в настоящее время затруднительно. Это требует накопления и детального анализа данных инструментальных наблюдений, а также проведения большого объема аналитических и численных расчетов, что и планируется сделать в дальнейшем.

По мнению авторов и в представленном виде результаты исследований дополняют соответствующую базу данных и могут представлять интерес при совершенствовании известных и разработке новых моделей влияния вулканической деятельности на окружающую геофизическую среду и их верификации.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по государственному заданию ИДГ РАН (регистрационный номер НИР: АААА-А19-119021890067-0; шифр темы: 0146-2019-0009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П.* О природе воздушных волн при сильных взрывных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
- Адушкин В.В., Фирстов П.П.* Особенности взрывных процессов вулканических извержений и их проявление в волновых возмущениях в атмосфере. Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. М.: ИФЗ РАН. 2010. С. 264–278.
- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.
- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А., Харламов В.А.* О связи параметров инфразвуковых волн с энергией источника // Физика Земли. 2019. № 6. С. 96–106.
- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС. 2018. 464 с.
- Барышев В.И., Ваг Л.Л., Гаврилов Б.Г., Полетаев А.С.* Датчик приземного вертикального тока атмосферы. Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС. 2009. С. 358–364.

- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Копылов Н.П., Шацких Ю.В. Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах // Физика горения и взрыва. 1983. № 4. С. 62–64.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Анисимов С.В., Педанов М.В., Куличков С.Н., Мордухович М.И., Копылов Н.П., Шацких Ю.В., Русаков Н.М. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 3. С. 573–576.
- Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. О Механизме генерации длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающим облаком продуктов взрыва // Физика горения и взрыва. 1987. № 2. С. 91–97.
- Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о Райкоке, центральные Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 3. С. 304–317.
- Заславский Б.И., Юрьев Б.В. О движении термик в стратифицированной атмосфере // Прикладная математика и техническая физика. Т. 40. № 5. 1999. С. 33–39.
- Зецер Ю.И., Рыбнов Ю.С., Ковалев А.Т., Ковалева И.Х., Попова О.П., Харламов В.А. Генерация волновых возмущений в атмосфере и ионосфере при работе нагревных стендов // Динамические процессы в геосферах. Вып. 3. М.: ГЕОС. 2012. С. 149–156.
- Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Попель С.И., Попова О.П. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4. М.: ГЕОС. 2013. С. 41–50.
- Куличков С.Н., Буш Г.А. Быстрые вариации инфразвуковых сигналов на больших расстояниях от однотипных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 331–338.
- Куличков С.Н., Авиллов К.В., Буш Г.А., Попов О.Е. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
- Куницын В.Е., Шалимов С.Л. Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011. № 5. С. 75–78.
- Пасечник И.П. Сейсмические и воздушные волны, возникшие при извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1958. С. 1121–1126.
- Орлов В.В., Уралов А.М. Реакция атмосферы на слабый наземный взрыв // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 6. С. 476–484.
- Руленко О.П. Электрические процессы в парогазовых облаках вулкана Карымского // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 5. С. 1083–1086.
- Руленко О.П. Электризация вулканических облаков // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 71–83.
- Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты в приповерхностной зоне Земли. М.: Графитекс. 2016. 150 с.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 1982. 136 с.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Сторчеус А.В., Фирстов П.П., Озеров А.Ю. Возможный механизм генерации акустических и сейсмических волн при пульсирующем истечении газо-пепловой смеси на вулкане Карымский // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 3–16.
- Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчеус А.В. Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого Толбачинского извержения в сентябре 1975 г. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 259. № 5. С. 1078–1081.
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт, Чернева Н.В., Шевцов Б.М. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Швелуч 16 ноября 2014 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 29–37.
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А., Максимов А.П., Маневич Т.М., Мельников Д.В. Электризация эруптивных облаков вулкана Швелуч в зависимости от характера эксплозии // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62.
- Черногор Л.Ф. Динамика конвективного подъема нагретых образований в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 626–634.
- Firstov P.P. Wave perturbation in the atmosphere as a method of remote monitoring of volcanic eruptions // Intern. Volcanol. Congress. JAVEI. Ankara. Theme 7. 1994.
- Firstov P.P. Wave disturbances in the atmosphere as a source of information on dynamics of volcanic eruptions // EOS. 1996. F 813. V. 318-3.
- Gossard E.A., Hook W.H. Waves in the atmosphere. Amsterdam; Oxford; N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Comp. 1975. 456 p.
- James M.R., Lane S.J., Jennie S.G. Volcanic plume electrification: experimental investigation of a fracture-charging mechanism // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2000. V. 105.B7. P. 16641–16649.
- Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity // Surveys in geophysics. 1997. V. 18. P. 441–475.
- Lane S.J., Gilbert J.S. Electric potential gradient changes during explosive activity at Sakurajima volcano, Japan // Bull. Volcanology. 1992. V. 54. № 7. P. 590–594.
- Mather T.A., Harison R.G. Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. № 4. P. 387–432.
- Murayama N. Propagation of atmospheric pressure waves produced by the explosion of volcano Bezymianny of March 30, 1956 and transport of the volcanic ashes // Quart. J. Seismol. 1969. V. 33. № 1. P. 1–11.
- Reed I.W. Air pressure waves from Mt. St. Helens eruption // EOS. 1980. V. 61. № 46. P. 1136.
- Stewart K.H. Air waves from a volcanic explosion // Met. Mag. 1959. V. 88. P. 1–3.

## **Acoustic, Magnetic and Electric Effects of Stromboli Volcano Eruption, Italy, in July–August 2019**

**A. A. Spivak<sup>a,\*</sup>, Yu. S. Rybnov<sup>a</sup>, S. A. Ryabova<sup>a</sup>, S. P. Soloviev<sup>a</sup>, and V. A. Kharlamov<sup>a</sup>**

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

*\*e-mail: aaspivak100@gmail.com*

The results of instrumental observations of acoustic oscillations, geomagnetic variations, and variations in the electric field and atmospheric electric current during the activation of the Stromboli volcano, Italy, in 2019 are presented. Separately considered are the periods of explosive activity and the interval marked by intense emission of incandescent ash-and-gas ejecta. It is shown that the volcanic activity is accompanied by the generation of acoustic signal at the explosive stages of the eruption and by the emergence of internal gravity waves at the stage of intense ash-and-gas ejection. The characteristic variations in the Earth's magnetic field and in the electrical parameters of the atmospheric surface layer are observed during different periods of the volcanic eruption. The presented results expand the existing database and can be useful for improving the existing models and for developing the new models of the impact of volcanic activity on the geophysical environment as well as for verifying these models.

*Keywords:* volcano, eruption, explosion, ash-and-gas ejection, acoustic signal, geomagnetic variations, variations in the electric field