

УДК 551.594

ХАРАКТЕРНАЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ СИЛЬНЫХ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ ШИВЕЛУЧ И БЕЗЫМЯННЫЙ (П-ОВ КАМЧАТКА)

© 2024 г. Р. Р. Акбашев^{a, b, *}, Е. И. Малкин^c, Н. В. Чернева^c

^aКамчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^bКамчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
ул. Пограничная, 4, Петропавловск-Камчатский, 683032 Россия

^cИнститут космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
ул. Мирная, 7, с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, 684034 Россия

*e-mail: arr@emsd.ru

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 11.01.2024 г.

Принята к публикации 22.04.2024 г.

Представлен анализ зарегистрированных вариаций (аномалий) градиента потенциала электрического поля атмосферы, связанных с распространением эруптивных облаков от извержений вулкана Шивелуч и Безымянный (п-ов Камчатка). Аномалии регистрировались на различных расстояниях от центров извержений и в разных условиях стратификации атмосферы. Такие условия позволили показать, что в эруптивных облаках вулканов Шивелуч и Безымянный формируется объемная электростатическая структура, которая соответствует известной феноменологической модели, предложенной на основании исследований, проведенных на различных вулканах мира. Согласно данной модели, в верхней части эруптивного облака формируется положительный объемный электростатический заряд, в средней — отрицательный, в нижней — положительный.

Ключевые слова: эксплозивное облако, электризация эруптивных облаков, градиент потенциала электрического поля атмосферы, объемный электростатический заряд

DOI: 10.31857/S0203030624040026, EDN: IYDJYS

ВВЕДЕНИЕ

Во время эксплозивных извержений вулканов развивается эруптивная колонна, которая может подниматься до высот тропопаузы, а при наиболее сильных извержениях поднимается выше тропопаузы, достигая высот стратосферы [Meng, 2022; Горшков, 1965]. Под влиянием условий ветровой стратификации атмосферы формируются пепловые шлейфы, эруптивные облака, которые распространяются на сотни километров [Гирина, 2017]. Эруптивное облако представлено вулканическими газами, аэрозолем и пеплами. В результате ряда физических процессов, таких как трибоэлектризация, фрактоэмиссия, взаимодействие продуктов извержения с метеорологическими облаками, продукты извержения электризуются.

В эруптивном облаке формируются объемные электростатические структуры, заряды которых могут достигать значений пробоя воздуха [Mather, Harrison, 2006; Руленко, 1994; Behnke, 2013]. Поэтому эволюция эруптивного облака, как правило, сопровождается вулканическими молниями и разрядами [Mendez et al., 2021; Thomas et al., 2007; Behnke et al., 2013; Cimorelli et al., 2016; Aizawa et al., 2016; Arason et al., 2011; Van Eaton et al., 2020; Firstov et al., 2020; Shevtsov et al., 2016; Firstov et al., 2019].

Одним из основных механизмов заряжения частиц пеплов является фрактоэмиссия. При этом механизме зарядение частиц связано с фрагментацией магмы во время начального взрывного процесса, также данный процесс зарядения возможен при инъекции

пепло-газовой струи в атмосферу, когда при соударении частиц они разрушаются [Mueller et al., 2017; James et al., 2000]. Предполагается, что именно с этим механизмом заряжения связаны множественные кратерные разряды, которые генерируют непрерывный электромагнитный шум (continual radio frequency or CRF) и проявляется в виде относительно высокой частоты импульсов УКВ-излучения (от нескольких тысяч до более чем десяти тысяч импульсов в секунду) [Mendez et al., 2021; Smith et al., 2018; Thomas et al., 2007; Behnke et al., 2013, 2018; Behnke, Bruning, 2015].

На этапе инъекции пепло-газовой струи основным механизмом электризации продуктов извержения становится трибоэлектризация – контактная электризация [Mendez et al., 2021; Руленко и др., 1986; Aplin et al., 2014, 2016; Mendez et al., 2021].

Когда эруптивная колонна достигает максимальной высоты подъема и в условиях ветровой стратификации формируется эруптивное облако, процессы электризации в нем схожи с процессами формирования объемных электростатических зарядов в метеорологических облаках, где важным этапом становится формирование градин. При этом частицы пеплов становятся ядрами конденсации, которые при соприкосновении с переохлажденной водой формируют градины [Arason et al., 2011; Van Eaton et al., 2020].

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В центральной части п-ова Камчатка располагается Северная группа вулканов, включающая четыре действующих вулкана: Шивелуч, Ключевской – самый высокий (4750 м) и продуктивный вулкан Евразии, Безымянный и Плоский Толбачик (рис. 1). Вблизи Северной группы вулканов на сейсмических станциях Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) в пунктах “Ключи” (KLY) и “Козыревск” (KZY) осуществляется регистрация градиента потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) электростатическим флюксметром типа ЭФ-4 с верхней граничной частотой 5 Гц и среднеквадратичной погрешностью измерений 5 мВ [Ефимов и др., 2013]. Данные с этих пунктов позволяют, наряду с традиционными задачами атмосферного электричества (изучение унитарной вариации, механизмы глобальной электрической цепи и т.д.), исследовать электростатическую структуру эруптивных облаков. Подробное описание действующей сети пунктов наблюдения V' ЭПА аппаратно-программного комплекса дано в работе [Akbashev et al., 2021].

Для регистрации импульсного электромагнитного излучения (ИЭИ) от грозовых разрядов

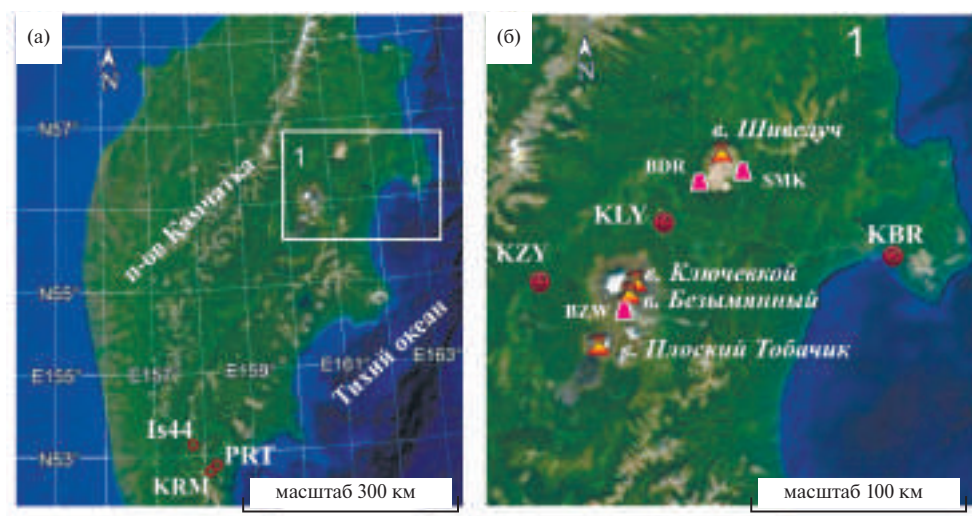


Рис. 1. Схема расположения пунктов регистрации V' ЭПА на п-ове Камчатка.

а – общий вид, б – увеличенный фрагмент схемы в районе северной группы вулканов.

KLY – пос. Ключи, KZY – пос. Козыревск, KBR – пос. Крутоберегово, IS44 – инфразвуковая станция, PRT – обсерватория ИКИР ДВО РАН, KRM – обсерватория ИКИР ДВО РАН.

в Институте космических исследований и распространения волн (ИКИР) ДВО РАН был создан пеленгатор очень низких частот (ОНЧ-пеленгатор, $f \approx 0.5\text{--}60$ кГц). Описание программно-аппаратного комплекса для регистрации ИЭИ дано в работе [Druzhin et al., 2019]. Помимо ОНЧ-пеленгатора, расположенного на станции наблюдений “Карымшина” (KRM) (см. рис. 1), ИКИР ДВО РАН ведет регистрацию ИЭИ в обсерватории “Паратунка” (см. рис. 1) с временной точностью до нескольких микросекунд от вулканических молний с помощью сегмента мировой сети определения координат грозных разрядов World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [Dowden et al., 2002], которая дает отличный результат для мониторинга распространения эруптивных облаков в случае оптимального расположения пунктов сети. В качестве основного источника информации в данной работе используются данные сети пунктов градиента потенциала электрического поля атмосферы и ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН.

Селекция сигналов в записях V' ЭПА от эруптивных облаков выполнялась на основании комплексирования данных геофизического контроля, выполняемого в КФ ФИЦ ЕГС РАН: сейсмического, инфразвукового, видеомониторинга. При анализе в работе использовались спутниковые наблюдения активности вулканов Камчатки и данные баллонного зондирования с привлечением метеоданных и данных регистрации гроз. Комплексный анализ данных позволил восстановить кинематические параметры распространения эруптивных облаков на момент регистрации откликов V' ЭПА [Фирстов и др., 2017, 2019, 2020; Akbashev et al., 2018].

ОТКЛИК ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭРУПТИВНЫЕ ОБЛАКА ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

Вулкан Шивелуч – самый северный из действующих вулканов Камчатки ($56^{\circ}47'$ с.ш., $157^{\circ}56'$ в.д.) с высотой экстррузивного купола 2500 м над уровнем моря (н.у.м.). В последние десятилетия его активность обусловлена медленным выжиманием магмы и формированием купола. При достижении критических значений давления и температуры возникают сильные эксплозивные извержения. Для некоторых из них эруптивное облако достигает высоты тропопаузы (~ 10 км н.у.м.), а в поселках Ключи и Козыревск выпадает пепел. За период наблюдений 2013–2018 гг. в KZY, KLY зарегистрировано 4 отклика в вариациях V' ЭПА (табл. 1), связанных с движением эруптивных облаков, сформированных в результате эксплозивных извержений вулкана Шивелуч. Анализ этих событий представлен в работах [Фирстов и др., 2017, 2019, 2020].

Рассмотрим подробно события Ш-1 и Ш-3 (см. табл. 1).

Извержение 16 ноября 2014 г.

Все эксплозивные извержения вулкана Шивелуч сопровождаются сейсмическими сигналами, которые регистрируются сетью радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС) КФ ФИЦ ЕГС РАН. По этим данным (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) во время извержения 16 ноября 2014 г. высота эруптивной колоны составила 12 км н.у.м., такая оценка дана по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, 2015]. На сейсмических записях

Таблица 1. Параметры откликов V' ЭПА, зарегистрированных от эруптивных облаков извержений вулкана Шивелуч

Событие	Дата	t_0	KZY			KLY			
			полярность	V' , кВ/м	Δt , мин	полярность	V' , кВ/м	Δt , мин	δ , г/м ²
Ш-1	16.11.2014	10:17:55	+	0.17	85	Пункт не работал			
Ш-2	16.12.2016	22:31:32	Облако прошло мимо			–	–0.125	51	20
Ш-3	14.06.2017	16:26:37	+	2	360	– / +	–5.9 / +4.8	40 / 34	~300
Ш-4	30.12.2018	00:34:46	Пункт не работал			–	–0.59	90	80

сейсмостанции BDR выделяется сигнал с максимальной скоростью смещения грунта на всех трех сейсмометрах (N-S, W-E, Z) более 40 мкм/с в течение 13 мин. На рис. 2а показан фрагмент регистрации эксплозивного землетрясения на вертикальной составляющей скорости смещения грунта. Время вступления сейсмического сигнала можно рассматривать как время начала эксплозивного извержения с точностью до секунды — $t_0 \approx 10:17:55$.

Представление о конфигурации сформировавшегося эруптивного облака дает спутниковый снимок (Landsat 8), полученный через 22 мин после начала извержения (см. рис. 2б). Головная часть эруптивного облака близка к окружности диаметром ~ 30 км и существенно нагружена пеплом (темная окраска). По данным баллонного зондирования атмосферы (метеостанция в п. Ключи Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) (<http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/intl2000.wmo>) на 12 ч 00 мин 16 ноября 2014 г. были построены температурная

и ветровая стратификация до высоты 25 км. Температурная стратификация (профиль температуры) на высотах 9–10 и 12 км имеет две инверсии (см. рис. 2в), на этих высотах скорость ветра равна 11 м/с и 17 м/с (см. рис. 2г) северного и северо-восточного направления с азимутом 50° и 80° соответственно (см. рис. 2д). Высота нижней температурной инверсии соответствует высоте тропопавзы, характерной для Камчатки в осенне-зимний период.

Развитие эруптивного облака также прослеживается молниевыми разрядами, возникшими при его формировании и движении. Сетью WWLLN было зарегистрировано семь разрядов, время и координаты которых приведены в табл. 2. На интервале 25–40 с после начала извержения зарегистрировано три разряда вблизи эруптивного центра, которые, по-видимому, сопровождали подъем и формирование эруптивной колонны. Следующие три разряда произошли почти одновременно через 8.5 мин, предположительно, на фронте сносимого ветром эруптивного облака при его

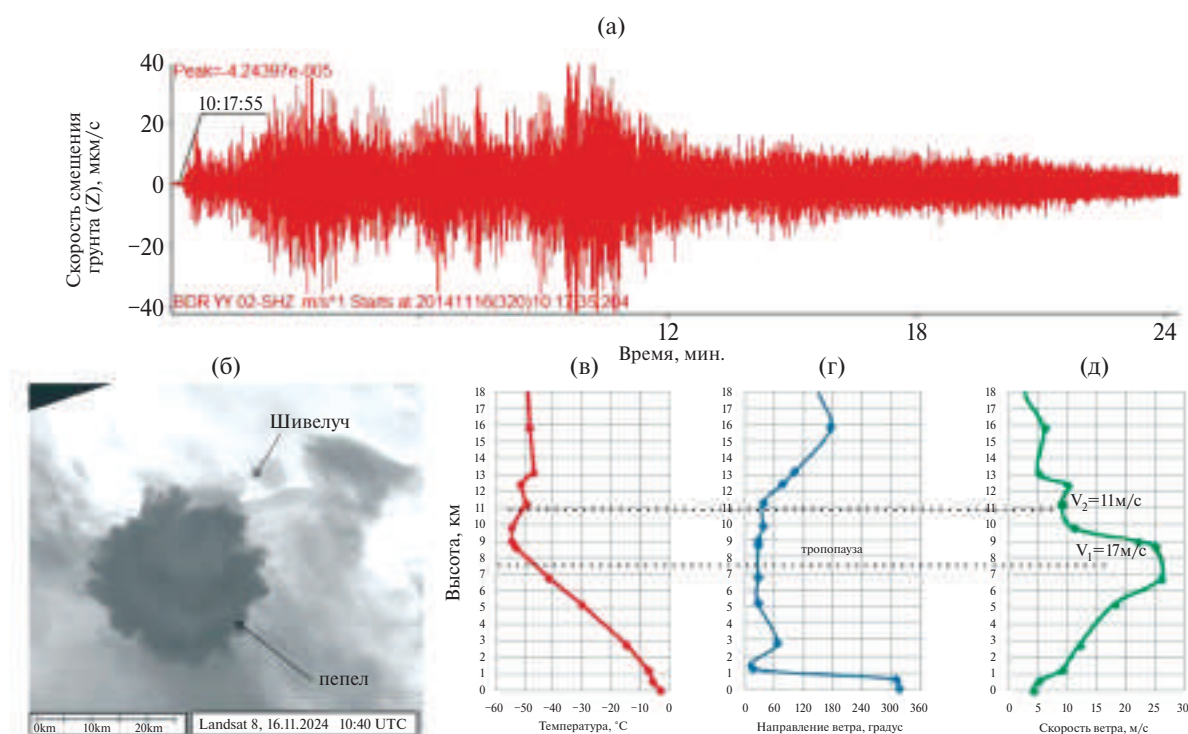


Рис. 2. Данные мониторинга эксплозивного извержения и распространения эруптивного облака.

а — вертикальная компонента скорости колебания грунта сейсмического сигнала на BDR, сопровождавшего эксплозивное извержение 16.11.2014 г. вулкана Шивелуч; б — спутниковый снимок (Landsat 8) эруптивного облака эксплозивного извержения вулкана Шивелуч, выполненный в 10:40 16.11.2014 г.; в — данные метеорологической обсерватории «Ключи» на 12:00 16 ноября 2014 г.: стратификация температуры; г — направления ветра; д — скорости ветра.

Таблица 2. Хронология развития эруптивного облака от эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г.

№	Событие	Время	φ, с.ш.	λ, в.д.	R, км	v, м/с
1	Приход сейсмической волны на BDR	10:17:55.3				
2	Разряды от вулканических молний	10:19:16.1	56.58	161.31	2.7	
3		10:19:26.7	56.67	161.38	4.5	
4		10:19:33.8	56.82	161.31	8.9	
5		10:26:22.6	56.56	161.23	10.9	
6		10:26:22.6	56.60	161.17	10.8	
7		10:26:22.6	56.64	161.13	11.9	
8		10:36:10.2	56.53	161.31	20.5	18.7
9	Спутниковый снимок-1	10:40				
10	Отклик в вариация V' ЭПА на станции KZY	12:04	1 фронт		113.0	17.7
11		13:10	2 фронт		113.0	10.9

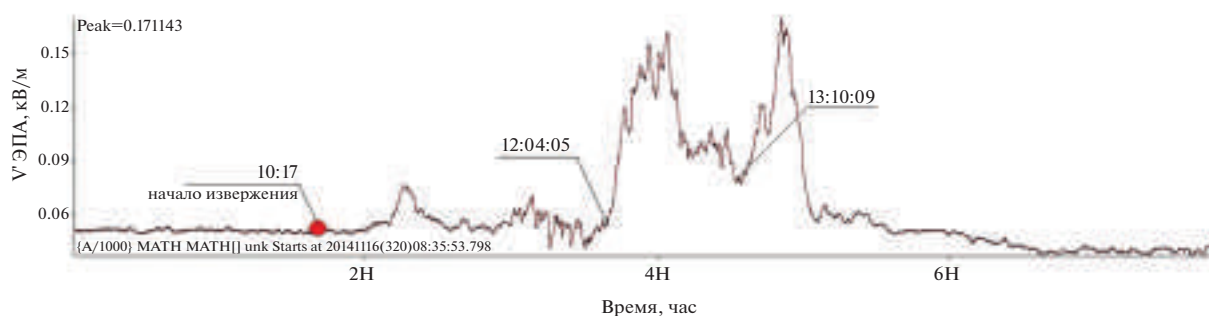
соприкосновении с более холодной облачной структурой. Последний разряд зарегистрирован через 17 мин на расстоянии 20.5 км от кратера.

В пункте KZY перед извержением фоновое значение V' ЭПА было относительно спокойное и составляло >0.06 кВ/м (рис. 3). В 10 ч 45 мин видны первые слабые вариации V' ЭПА, а почти через два часа после извержения на записи V' ЭПА выделяются четкие вступления двух аномалий (12 ч 04 мин и 13 ч 10 мин) общей длительностью около 90 мин, когда в максимуме значение V' ЭПА достигает 0.17 кВ/м. Также видно, что перед хорошо выраженными положительными аномалиями V' ЭПА в течение 78 мин наблюдаются более “высокочастотные” колебания с амплитудой ~ 0.01 кВ/м. Сами аномалии также осложнены “высокочастотными” колебаниями. Такая структура сигнала свидетельствует о сложном распределении объемной плотности электростатического заряда

в эруптивном облаке, при этом в электростатической структуре эруптивного облака на момент регистрации преобладающим зарядом является положительный.

С использованием разности времен между t_0 и временами прихода вступлений обоих аномалий V' ЭПА получены оценки скорости движения эруптивного облака, которые составили 17.7 м/с и 10.9 м/с соответственно. Совпадение скоростей распространения аэроэлектрических структур со скоростями ветра на определенных высотах указывает на то, что распространение эруптивного облака от извержения вулкана Шивелуч 16.11.2014 г. могло происходить на двух высотах 8–10 и 12 км.

На основании комплексного анализа данных были восстановлены кинематические параметры распространения эруптивного облака. Эти данные позволили оценить электростатический заряд для обеих частей эруптивного облака по формуле: $Q = V' \cdot (2\pi\epsilon_0 R_{\min}^3 / z)$ [Чернева,

**Рис. 3.** Фрагменты записи градиента потенциала электрического поля в KZY при распространении эруптивного облака от извержения в Шивелуч 16.11.2014 г.

2007], где ε_0 — диэлектрическая постоянная, $R_{\min} = 25$ км — минимальное расстояние от регистратора до горизонтальной проекции траектории эруптивного облака, $z = 10$ (12) км — высота распространения эруптивного облака. Заряд эруптивного облака оценен в 17.7 Кл и 23.8 Кл соответственно.

Извержение 14 июня 2017 г.

Во время этого эксплозивного извержения, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), высота эруптивной колоны, оцененная по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, Сеньюков, 2015], составила ~12 км. На SMK эксплозивное землетрясение, сопровождавшее это извержение, имело длительность около 10 мин. Ограниченная динамическим диапазоном аппаратура не позволила зарегистрировать максимальную амплитуду скорости смещения грунта, но можно говорить, что ее амплитуда превысила $A_{\max} > 40$ мкм/с. На рис. 4а показан фрагмент записи скорости смещения грунта вертикальной компоненты.

Данное извержение сопровождалось воздушной ударной волной, которая с расстоянием эволюционировала в инфразвуковую и была зарегистрирована всеми микробарографическими приборами на п-ове Камчатка (рис. 5). Время задержки акустического сигнала относительно сейсмического сигнала на SMK, который можно считать началом извержения, для KLY составило 2.19 мин, а для KZY — 5.28 мин. На IS44 выделяются два прихода отдельных групп инфразвуковых волн, связанных с распространением звукового луча в стратосферном и тропосферном волноводах.

На спутниковых снимках (HIMAWARI-8, данные Regional and Mesoscale Meteorology Branch NOAA/NESDIS, <http://rammb.cira.colostate.edu/>) видно, что через 34 мин после извержения сформировалось почти круговое эруптивное облако диаметром ~70 км на высоте 9 км (см. рис. 5б). Далее, согласно ветровой стратификации, эруптивное облако стало двигаться к пос. Ключи со скоростью 12 м/с (см. рис. 5б, 5в, 5г). Формирование эруптивного облака в первые минуты после начала эксплозивного извержения зафиксировано на станции KLY видеокамерой комплекса геофизического

мониторинга активности вулкана Шивелуч (см. рис. 5д).

Почти через час эруптивное облако достигло пос. Ключи, где выпало 100 г/м² пепла, после чего продолжило движение по направлению к Ключевскому вулкану (см. рис. 5е, 5ж). В 21:33 достигло пос. Козыревск, где наблюдалось слабое выпадение мелкодисперсного пепла.

По данным ОНЧ-пеленгатора формирования эруптивного облака сопровождалось ИЭИ, о чем свидетельствует азимут регистрируемых ИЭИ (рис. 6а), и показана динамика скорости счета ИЭИ в минутном интервале (см. рис. 6б). Определена длительность вулканической грозы, которая составила 13 мин [Малкин и др., 2023], максимальное значение скорости счета составило 75 имп./мин, азимут регистрируемых ИЭИ направлен на вулкан Шивелуч $25.6^\circ[\pm]10^\circ$.

Удачное сочетание условий хорошей погоды и направления ветра при извержении 14 июня 2017 г. позволили зарегистрировать отклик V'' ЭПА при распространении эруптивного облака над поселками Ключи и Козыревск.

С 17:40 на KLY началось уменьшение V'' ЭПА до -6 кВ/м, которое затем сменилось резким увеличением V'' ЭПА до $+5$ кВ/м (см. рис. 6в). Анализ данных спутникового мониторинга, видеонаблюдения и данных V'' ЭПА показал, что при приближении эруптивного облака к KLY регистрировалось отрицательное возмущение V'' ЭПА, которое отражает суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY от его электростатической структуры, что свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде в нем. В момент прохождения эруптивного облака над KLY с выпадением более крупных частиц пепла регистрировалось положительное возмущение в V'' ЭПА, что свидетельствует об объемном положительном заряде, который локализован в нижней области эруптивного облака.

На основании известных параметров распространения обеих частей эруптивного облака ($R = 0$ км, $h_1 = 5.7$ км, $h_2 = 4.1$ км) дана оценка их объемных электростатических зарядов, который составил -26 Кл для верхней области и 15 Кл для нижней области.

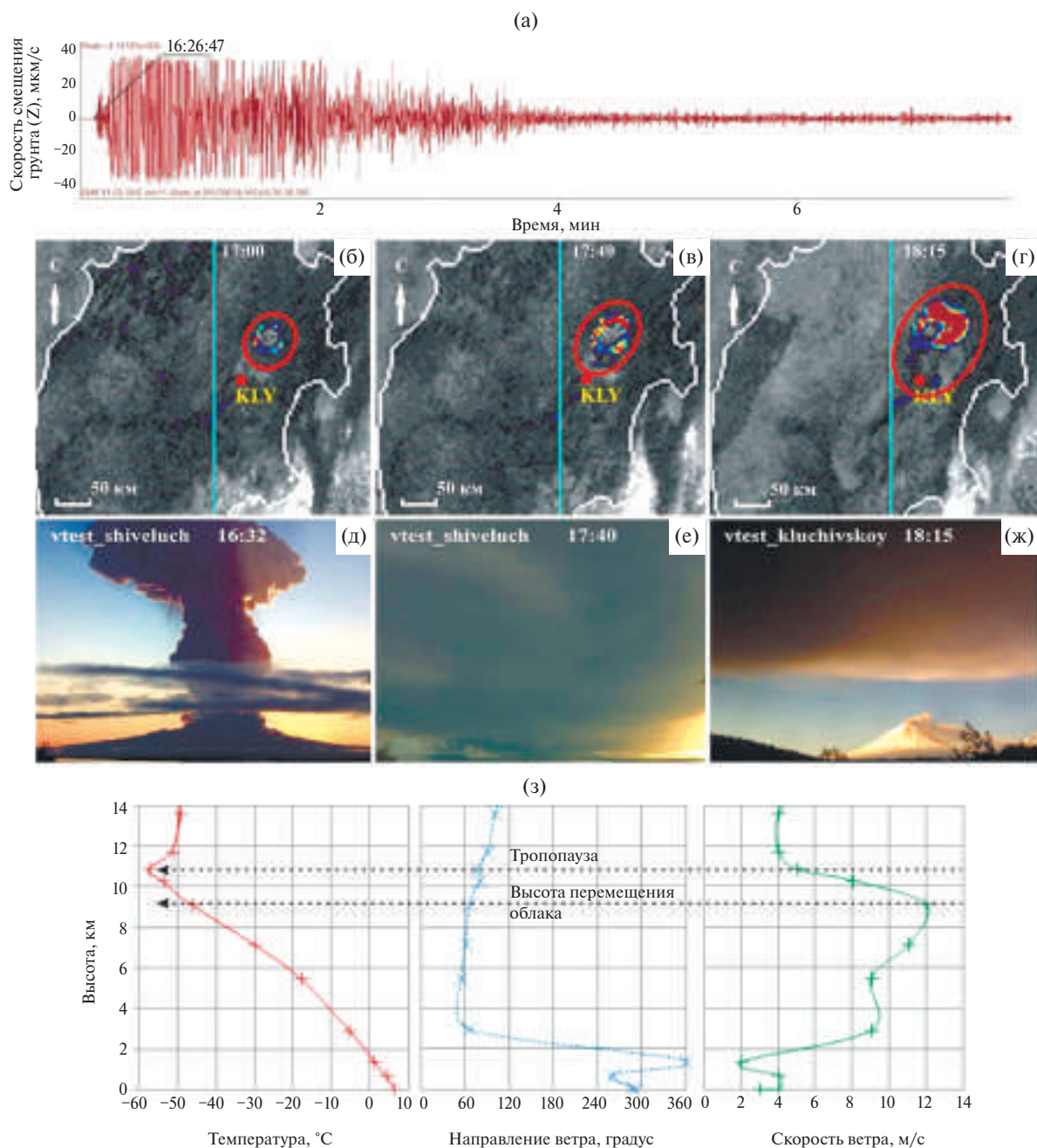


Рис. 4. Данные мониторинга взрывного извержения и распространения эруптивного облака.

а – вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на SMK, сопровождавшего explosive землетрясение 14.06.2017 г. в. Шивелуч; б, в, г – распространение эруптивного облака от извержения в. Шивелуч 14.06.2017 г.: в 16:26 по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8 (<http://rammb.cira.colostate.edu>); д, е, ж – развитие эруптивного облака, зафиксированное видеокамерой в KLY; з – температурная и ветровая стратификации атмосферы по данным баллонного зондирования в KLY.

Почти через 5 ч эруптивное облако достигло пос. Козыревск, где отмечалось выпадение незначительного количества мелкодисперсного пепла. Флюксметром KZY был зарегистрирован отклик 9 (см. рис. 6г) положительной полярности длительностью более 6 ч, с максимальной амплитудой сигнала 2 кВ/м. Характеристика

отклика свидетельствует о сильно растянутой структуре по направлению движения с преобладающим положительным зарядом. При этом изрезанный характер сигнала V'' ЭПА свидетельствует о том, что пепловый шлейф имеет сильно неоднородную электростатическую структуру с разными плотностями зарядов в нем.

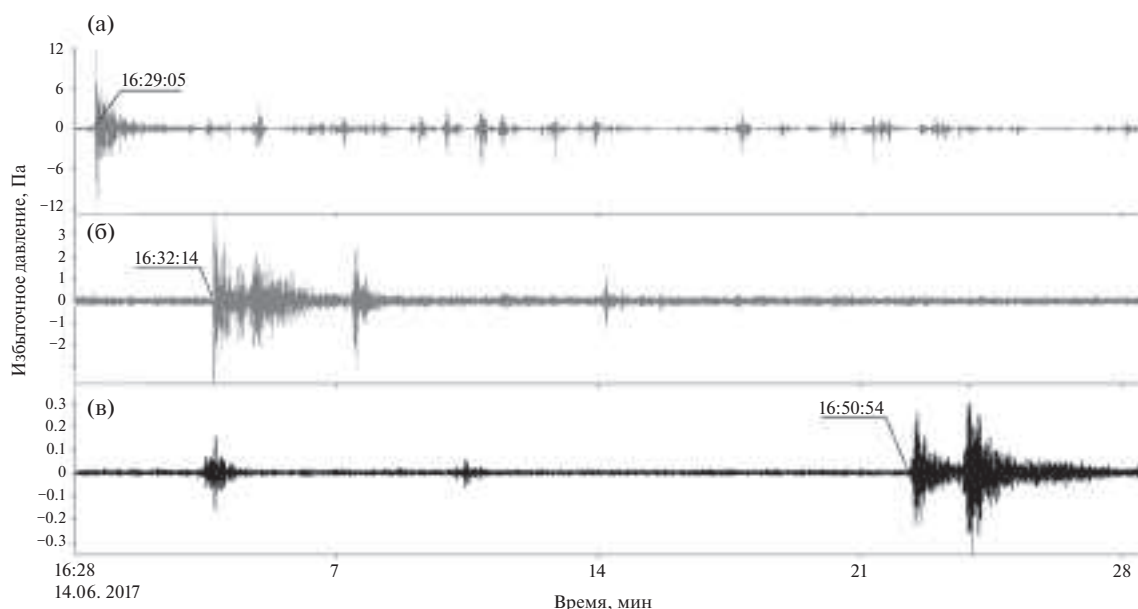


Рис. 5. Запись воздушной волны, сопровождавшей извержение 14.06.2017 г., на акустических станциях (а – KLY; б – KZY; в – IS44).

ОТКЛИК ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ОТ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

Один из наиболее активных вулканов мира – Безымянный (55.98° N, 160.59° E, высота 2869 м н.у.м.) расположен в центральной части Ключевской группы вулканов на п-ове Камчатка (см. рис. 1).

За период наблюдений 2013–2022 гг. в KLY зарегистрировано 2 отклика в вариациях I'' ЭПА (табл. 3), связанных с распространением эруптивных облаков от мощных эксплозивных извержений вулкана Безымянный [Firstov, 2021].

Извержение вулкана Безымянный 20 декабря 2017 г.

Во время этого эксплозивного извержения, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), высота эруптивного облака, оцененная по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, Сенюков, 2015], составила ~15 км.

Из записей ВЗВ эксплозивного землетрясения, возникшего во время извержения, следует, что извержение началось в 3:39:24 20.12.2017. В первые ~5 мин интенсивность сейсмического

сигнала плавно нарастала, после чего уровень сигнала резко возрос и в течение дальнейших 4 мин превышал динамический диапазон аппаратуры – $A_{\max} > 40$ мкм/с. По-видимому, в этот период началось извержение плинианского типа с мощным выбросом пепло-газовой смеси в атмосферу (рис. 7а). Затем амплитуда сигнала уменьшилась и почти ~5 мин сохранялась квазипостоянной с дальнейшим спадом до фона через 10 мин.

Согласно данным баллонного зондирования (см. рис. 7г, 7д, 7е), выполненного на метеостанции Камчатского УГМС в пос. Ключи на 00:00 20.12.2017 г., направление ветра на высоте 6–16 км сохраняло близкое значение ($\sim 220^{\circ}$) при значительных вариациях его скорости от 10 до 30 м/с. Направление и скорость распространения эруптивного облака хорошо прослеживается на спутниковых снимках Himawari-8 (<http://dvrcpod.planeta.smlslab.ru/animation/1513757110.gif>). По данным [Girina et al., 2018] площадь территории, над которой распространялось облако, составила ~78 000 км² (см. рис. 7в). Масса тефры этого извержения, отложившаяся на суше, по модельным расчетам составила $\sim 3 \cdot 10^7$ т (объем ~ 0.023 км³); протяженность отложений пирокластических потоков составила 6 км, грязевых потоков – до 18 км. При попадании пирокластических потоков в зону торможения возникали вторичные эруптивные облака. Этот

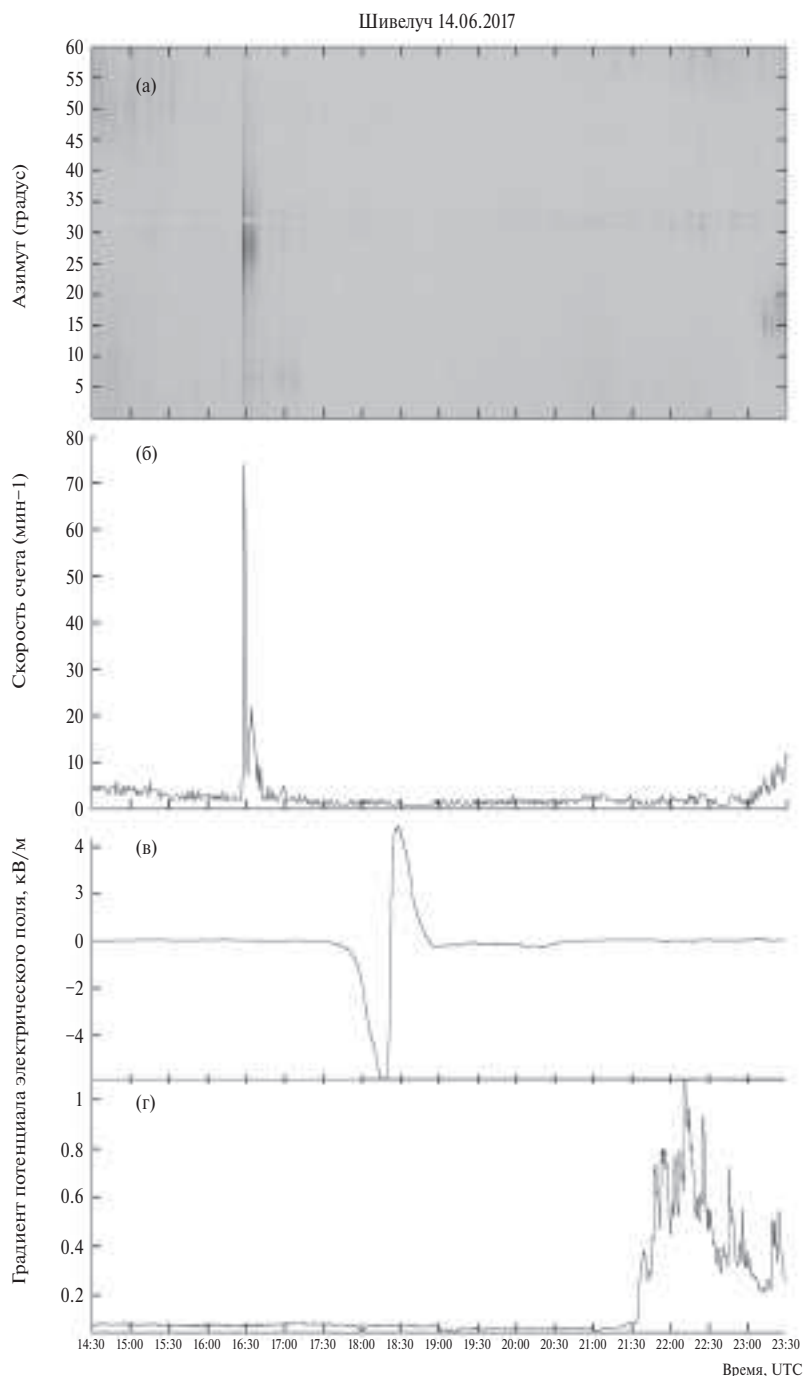


Рис. 6. Данные регистрации электромагнитных возмущений, сопровождающих извержение в. Шивелуч 14.06. 2017 г.

а — азимут прихода ИЭИ; б — скорость счета ИЭИ в минутных интервалах; в — фрагменты записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY; г — фрагменты записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KZY.

процесс способствовал созданию многоярусности эруптивного облака.

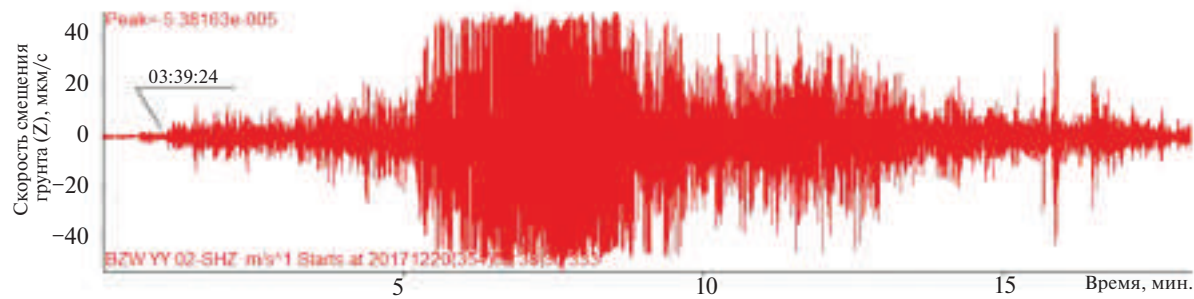
По данным ОНЧ-пеленгатора формирование эруптивного облака сопровождалось ИЭИ, о чем свидетельствует азимут регистрируемых

ИЭИ (рис. 8а). На рис. 8б показана динамика скорости счета ИЭИ в минутном интервале. Определена длительность вулканической грозы, которая составила 45 мин [Малкин и др., 2023], максимальное значение скорости счета

Таблица 3. Параметры откликов V'' ЭПА, зарегистрированных от эруптивных облаков извержений вулкана Безымянный

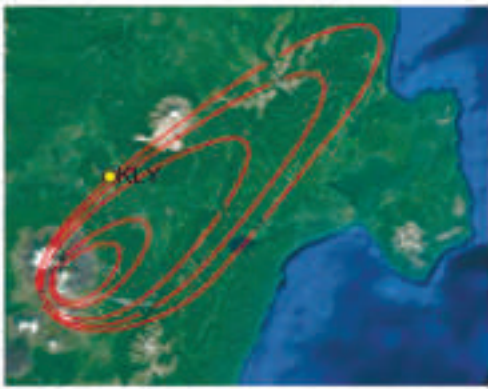
Событие	Дата	t_0	KLY				
			полярность	V' , кВ/м		Δt , мин	
Б-1	20.05.2017	3:39:24	—	−0.09	−0.08	20	90
Б-2	15.03.2022	12:51:19	+	1.3		75	пепел не выпадал

(а)



(б)

(в)



(г)

(д)

(е)

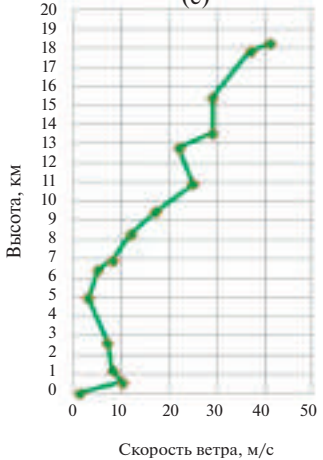
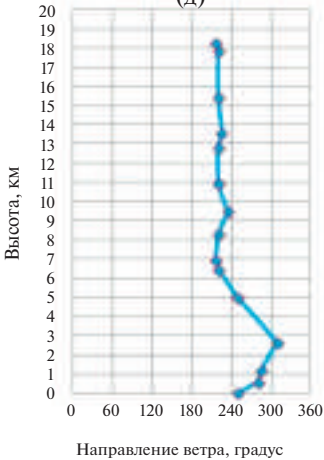
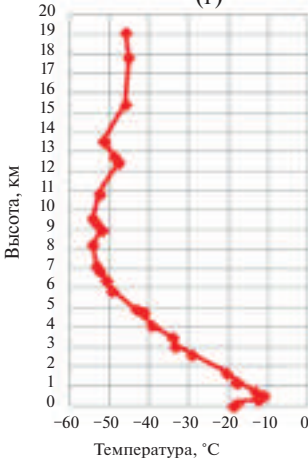


Рис. 7. Данные мониторинга эксплозивного извержения и распространения эруптивного облака. а – вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на BZW, сопровождавшего эксплозивное землетрясение 20.12.2017 г. вулкана Безымянный; б – фотография из KZY эруптивного облака на момент времени 03:59; в – расчетные изопохиты для отложений пирокластики извержения 20.12.2017, по [Girina et al., 2018]; г, д, е – температурная и ветровая стратификации атмосферы по данным баллонного зондирования в KLY 00:00 20.12.2017 г.

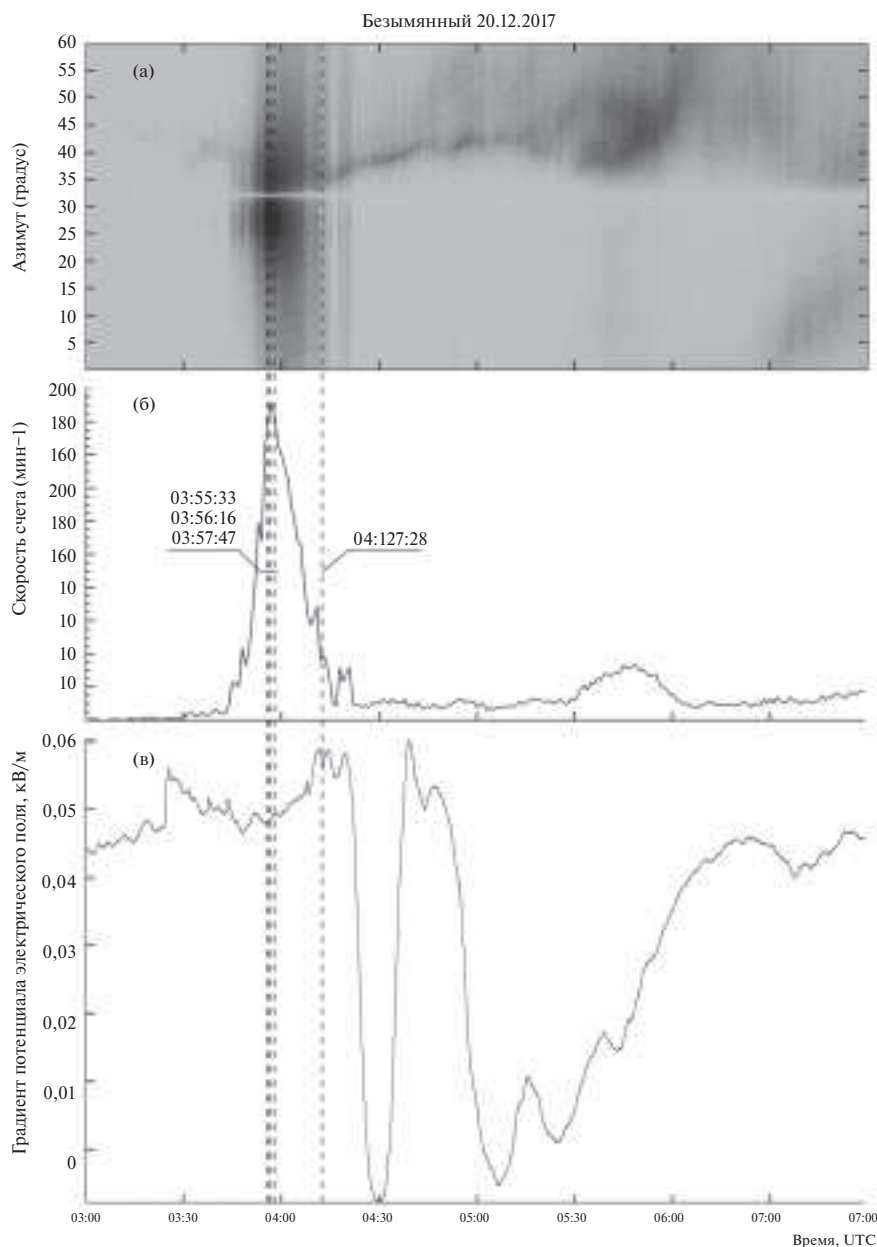


Рис. 8. Данные регистрации электромагнитных возмущений, сопровождающих извержение в. Безымянный 20.12.2017 г.

а – азимут прихода ИЭИ; б – скорость счета ИЭИ в минутных интервалах; в – фрагменты записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY. Пунктирной линией показаны моменты разрядов молний, зарегистрированные сетью WWLLN.

составило 195 имп./мин, азимут регистрируемых ИЭИ направлен на вулкан Безымянный $32.5^\circ[\pm]10^\circ$.

Ось пеплопада прошла в ~ 20 км от KLY (см. рис. 7в), пепел в пункте наблюдения не выпадал. Условия хорошей погоды позволили зарегистрировать электростатическим флюксметром отклик в вариация V' ЭПА от эруптивного облака

общей длительностью около двух часов. Отклик состоял из двух бухтообразных сигналов отрицательной полярности с амплитудой 0.06 кВ/м и 0.05 кВ/м длительностью 20 и 90 мин (см. рис. 8в). Распространение эруптивного облака на разных высотах под действием ветра происходило с разной скоростью, что было зафиксировано в поле V' ЭПА. Согласно стратификации атмосферы, первый

ярус облаков распространялся на высоте ~ 13 км со скоростью ~ 20 м/с, а второй — на 8 км со скоростью распространения ~ 10 –12 м/с. Такие параметры распространения соответствуют времени начала откликов в вариациях V' ЭПА.

Для данного события эруптивное облако распространялось в стороне относительно пункта регистрации, пепел в KLY не выпадал. Поэтому зарегистрированный отклик с отрицательным возмущением отражает суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY от всей электростатической структуры эруптивного облака, что свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде в нем на момент регистрации отклика.

На основании известных параметров распространения обеих частей эруптивного облака ($R = 20$ км, $h_1 = 13$ км, $h_2 = 8$ км) оценен их объемный электростатический заряд, который составил -9 и -7.5 Кл соответственно.

Извержение вулкана Безымянный 15 марта 2022 г.

По данным сейсмостанции BZW, на которой зарегистрировано эксплозивное землетрясение, следует, что извержение началось в 12:51:19 (рис. 9а). Максимальная высота эруптивного облака оценена в ~ 11 км н.у.м.

В этом случае верхняя область эруптивного облака распространялась преимущественно в северном направлении (180 – 210°) в соответствии с ветровой стратификацией на высоте 10 – 11 км со скоростью 5 – 8 м/с (см. рис. 9е, 9ж), его нижняя область распространялась на высоте 6 – 10 км в север-северо-западном направлении (150°) со скоростью 9 – 12 м/с. По данным Японского метеорологического агентства (http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html) на спутниковых снимках (Himawari-8) хорошо прослеживается развитие верхней и нижней областей эруптивного облака, их распространение согласно ветровой стратификации атмосферы (см. рис. 9б, 9в, 9г, 9е, 9ж). Таким образом, в этом случае над KLY распространялась верхняя область эруптивного облака на высоте тропопаузы и выше (см. рис. 9в, 9г).

Благодаря неоднородной стратификации атмосферы в момент извержения, эруптивное

облако оказалось растянутым, с наблюдаемым азимутальным угловым размером в 22.5° относительно станции “Карымшино” (KRM) (см. рис. 1), где расположен пеленгатор ИЭИ, работающий в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) [Firstov et al., 2020; Malkin et al., 2021]. Анализ данных ОНЧ-пеленгатора подтвердил наличие грозового очага в азимутальных углах от 8.2° до 27° (рис. 10а). При этом максимальная скорость счета составила 36 имп./мин (см. рис. 10б), общее количество зарегистрированных импульсов — 1138. Азимут прихода импульсного излучения (см. рис. 10а) для всех импульсов в первой фазе грозы составил $23.6^\circ \pm 0.4^\circ$, что совпадает с азимутальным направлением на сам вулкан. Максимальная интенсивность разрядов наблюдалась по прошествии 17 мин после начала извержения с азимутом $\sim 17^\circ$. При анализе начальных фаз зарегистрированных импульсов было выяснено, что пеленг положительных молний в динамике развития грозы монотонно смещался с уменьшением азимута (последний положительный импульс имел азимут 8.2°), в то время как отрицательные молнии фиксировались во всех азимутальных углах, обозначенных выше. Азимут прихода положительных импульсов свидетельствует о том, что верхняя часть сформированного эруптивного облака, распространявшаяся в северном направлении, проходила над пунктом KLY (см. рис. 1), что также свидетельствует о положительном объемном заряде этой части эруптивного облака.

В период времени с 13:30 до 14:30 в вариациях V' ЭПА был зарегистрирован отклик с положительным возмущением (см. рис. 10в), который отражает суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY от верхней области эруптивного облака, что также свидетельствует о преобладающем в нем положительном заряде на момент регистрации отклика.

На основании комплексного анализа данных были восстановлены кинематические параметры распространения эруптивного облака. С учетом минимального расстояния от регистратора до горизонтальной проекции траектории эруптивного облака $R_{\min} = 0$ км и высотой его распространения $h = 11$ км, заряд эруптивного облака оценен в $+12.2$ Кл.

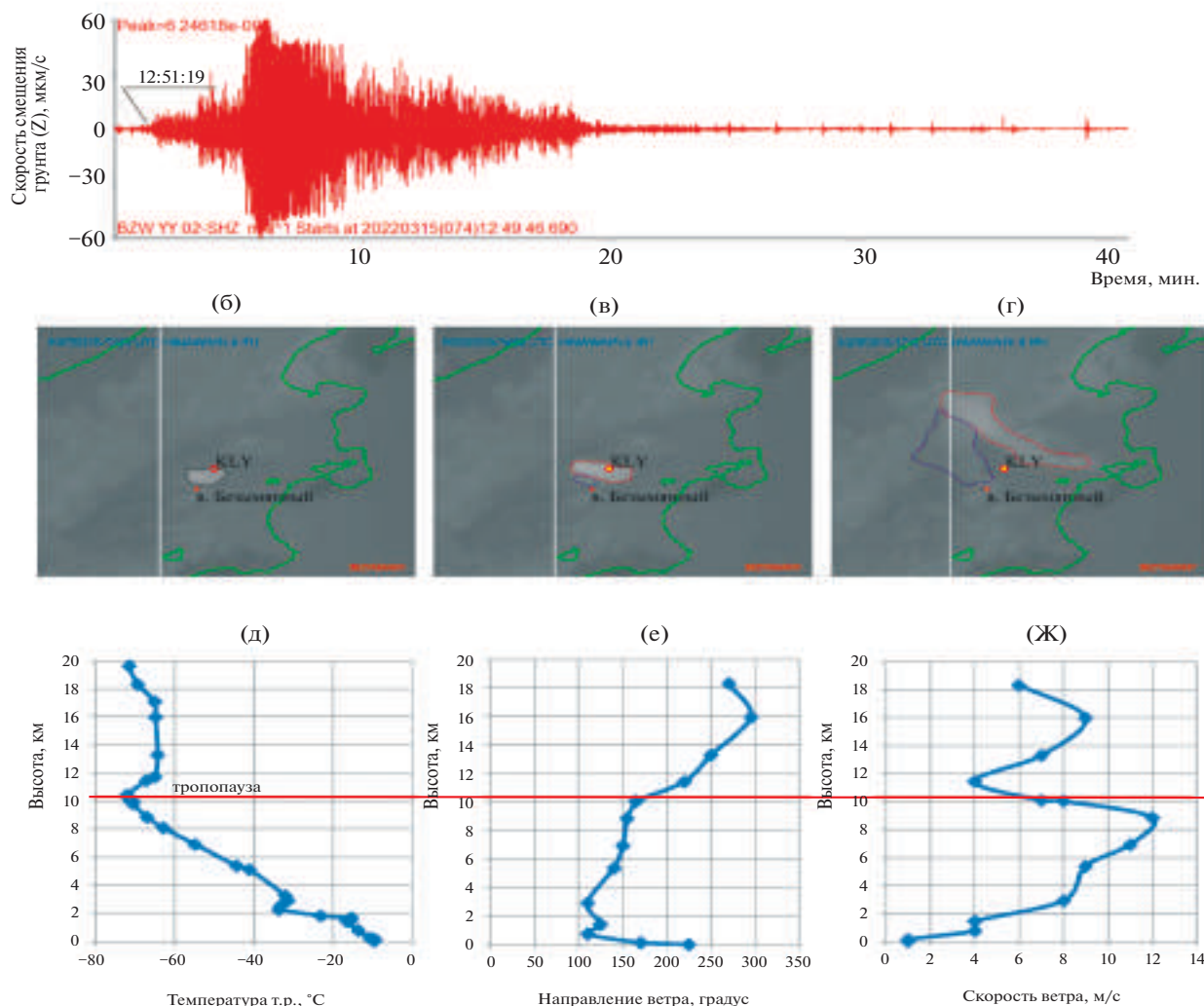


Рис. 9. Данные мониторинга эксплозивного извержения и распространения эруптивного облака.

а – вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на BZW, сопровождавшего эксплозивное землетрясение 15.03.2022 г. в. Безымянный; б, в, г – стадии распространения эруптивного облака по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8 (<http://rammb.cira.colostate.edu>): развитие эруптивного облака на 13:00 (б), 14:00 (в), 17:00 (г); д – данные высотного зондирования пос. Ключи 15.03.2022 12:00: температурная стратификация атмосферы; е, ж – ветровая стратификация атмосферы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании результатов натурных наблюдений градиента потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) на вулкане Сакурадзима (Япония) во время его извержения в 1991 г. [Lane, Gilbert, 1992] и в 1995 г. [Miura et al., 2002], а также на Большом трещинном Толбачинском извержении (БТТИ) в июле–октябре 1975 г. (п-ов Камчатка, Россия) [Руленко, Токарев, 1979] были предложены феноменологические схемы разделения объемных зарядов во время формирования

эруптивной колонны и при распространении эруптивного облака (рис. 11).

В этих работах распределение зарядов в эруптивном облаке объяснялось эоловой дифференциацией и седиментацией продуктов извержения в гравитационном поле. Такое распределение зарядов под влиянием условий ветровой стратификации атмосферы и в условиях гравитационного поля согласуются с известной феноменологической особенностью трибоэлектризации – биполярного заряжения частиц в зависимости от их размера (size-dependent bipolar charging (SDBC)), при этом

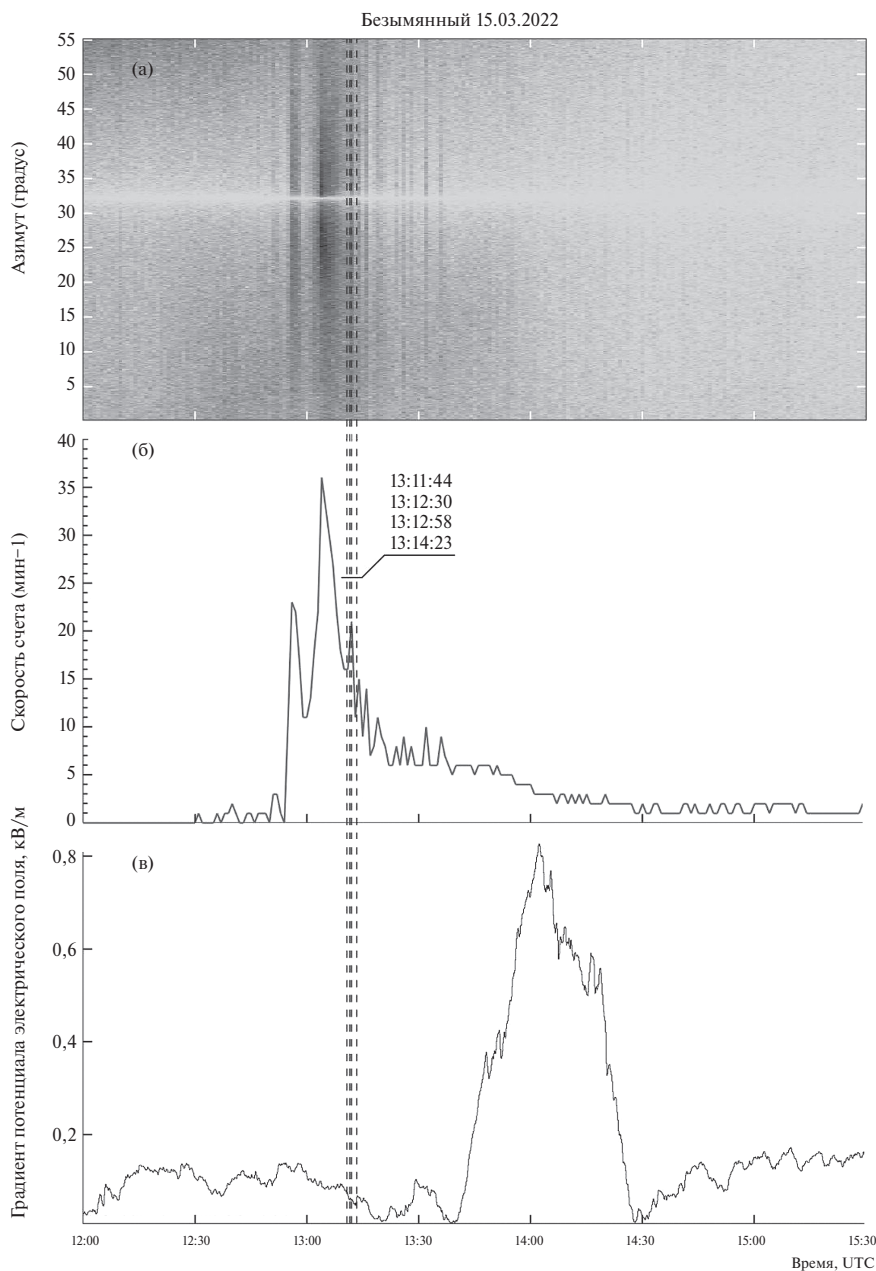


Рис. 10. Данные регистрации электромагнитных возмущений, сопровождающих извержение в. Безымянный 15.03.2022 г.

а – азимут прихода ИЭИ; б – скорость счета ИЭИ в минутных интервалах; в – фрагменты записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY. Пунктирной линией показаны моменты разрядов молний, зарегистрированные сетью WWLLN.

отрицательный заряд характерен для мелких частиц, а положительный – для более крупных [Mendez et al., 2021; Lacks, Levandovsky, 2007; Alois et al., 2017].

Анализ данных геофизического мониторинга активности вулканов, спутникового мониторинга, данных баллонного зондирования

атмосферы, данных регистрации гроз (ИКИР ДВО РАН) позволил восстановить кинематические параметры распространения верхней и нижней областей эруптивного облака в атмосфере от извержений вулканов Шивелуч и Безымянный. Это позволило установить взаимосвязь зарегистрированного отклика с объемными электростатическими

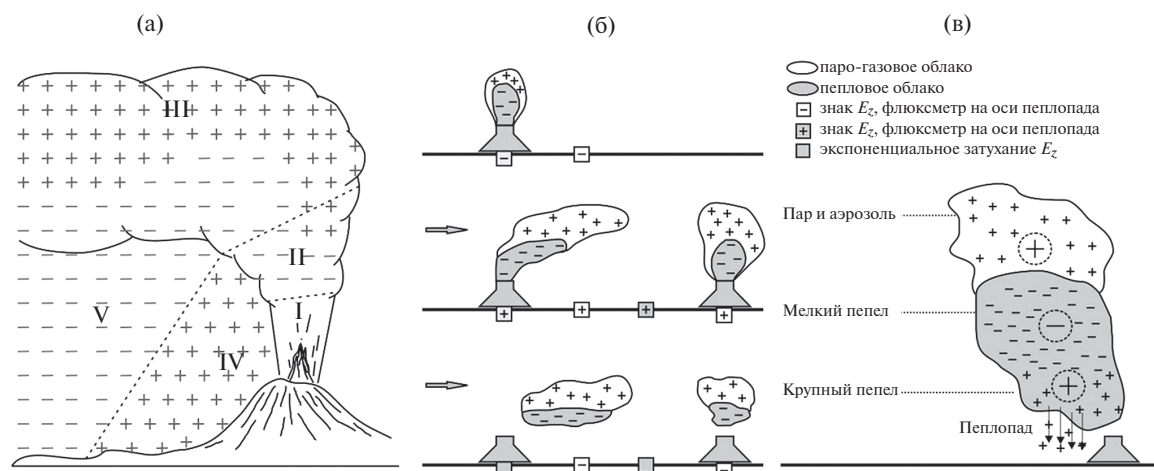


Рис. 11. Феноменологические схемы разделения заряда в эруптивно облаке: в ближней зоне от кратера вулкана [Руленко, 1994] (а); схемы разделения заряда при формировании вулканического шлейфа под действием ветра, согласно [Lane, Gilbert, 1992] (б); разделение зарядов в эруптивных облаках на основе натурных наблюдений на вулкане Сакурадзима по [Miura et al., 2002] (в).

I – разделение зарядов под действием гравитационных сил на начальном участке при слабом ветре; II – формирование облака на автономном участке под действием ветра; III – шлейф в зоне плавучести; IV – область выпадения крупной фракции; V – область выпадения тephры. Представленные модели адаптированы автором.

зарядами в эруптивном облаке. На основании этих данных показано, что в эруптивном облаке для эксплозий вулканов Шивелуч и Безымянный объемные электростатические заряды формируются по известной модели – positive/negative/positive (“P/N/P”) [Руленко, 1994; Miura, 2002]. Согласно модели, основной заряд в эруптивном облаке – отрицательный, который переносится мелким пеплом и локализован в его средней области. Положительный электростатический заряд формируется в нижней и верхней областях. В нижней области этот заряд переносится наиболее крупным пеплом, в верхней – аэрозолем и газом.

О преобладающем отрицательном заряде в эруптивных облаках вулканов Шивелуч и Безымянный могут свидетельствовать два события, которые рассмотрены в статье: 1) для вулкана Шивелуч – 14.07.2017 г.; 2) для вулкана Безымянный – 20.05.2017 г. Так, в первом случае при движении эруптивного облака к пункту наблюдения KLY наведенное суммарное электростатическое поле от всего облака характеризуется отрицательной полярностью в вариациях V' ЭПА (см. рис. 6в), а положительное возмущение зарегистрировано только в тот момент времени, когда эруптивное облако проходило над пунктом наблюдения в момент выпадения пепла. Это свидетельствует о том, что в нижней

области был сформирован положительный объемный электростатический заряд. Во втором случае стратификация атмосферы была такой, что эруптивное облако распространялось в одном направлении и в стороне от пункта наблюдения KLY (см. рис. 7в), при этом был зарегистрирован сигнал V' ЭПА с отрицательным возмущением (см. рис. 8в).

О сформированном положительном объемном электростатическом заряде в верхней части эруптивных облаках вулканов Шивелуч и Безымянный могут свидетельствовать три события, рассмотренные в статье: первые два для вулкана Шивелуч – 16.11.2014 г. и 14.07.2017 г., третье для вулкана Безымянный – 15.03.2022 г. Так в KZY, который расположен в 110 км от центра извержения (относительно вулкана Шивелуч), зарегистрированы сигналы V' ЭПА с положительным возмущением. При этом изрезанный характер сигнала V' ЭПА (см. рис. 3, 6г) свидетельствует о том, что пепловый шлейф имеет сильно неоднородную электростатическую структуру с разными плотностями зарядов в нем. Видимо в результате процессов эоловой и гравитационной седиментации на расстояниях более 100 км от центра извержения пепловый шлейф уже по большей части представлен аэрозолями и газами, которые на момент формирования эруптивного

облака были локализованы в верхней его области. О положительном объемном электростатическом заряде в верхней области эруптивного облака также свидетельствует положительное возмущение в вариациях градиента V'' ЭПА (см. рис. 10в), зарегистрированное в KLY (~40 км от центра извержения) при распространении эруптивного облака от эксплозии вулкана Безымянный 15.03.2022 г. В этом случае условия стратификации атмосферы были такими, что нижняя и средняя части эруптивного облака распространялись в северо-западном направлении, а верхняя часть — в северном. В результате над KLY распространялась только верхняя часть эруптивного облака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ данных геофизического мониторинга активности вулканов, спутникового мониторинга, данных баллонного зондирования атмосферы, данных регистрации гроз (ИКИР ДВО РАН) позволил восстановить кинематические параметры распространения верхней и нижней областей эруптивного облака в атмосфере от извержений вулканов Шивелуч и Безымянный. Восстановленные условия распространения эруптивных облаков исследуемых извержений были сопоставлены с данными градиента потенциала электрического поля атмосферы, что позволило выявить соответствующие объемные электростатические заряды в эруптивном облаке. В результате показано, что в эруптивном облаке для эксплозий вулканов Шивелуч и Безымянный объемные электростатические заряды формируются по известной модели — positive/negative/positive (“P/N/P”) [Руленко, 1994; Miura, 2002]. В верхней области положительный заряд, в средней — отрицательный, в нижней — положительный.

Конфигурация объемного заряда по модели “P/N/P”, по всей видимости, формируется уже в ближней зоне от кратера вулкана за счет процесса седиментации продуктов извержения в гравитационном поле. Однако для подтверждения необходимы дополнительные экспериментальные работы в ближней зоне от кратера вулканов. Следует отметить, что приведенная модель формирования объемных униполярных зарядов в эруптивном облаке

согласуется с известной феноменологической особенностью трибоэлектризации — биполярного заряжения частиц в зависимости от их размера (SDBC), при этом отрицательный заряд характерен для мелких частиц, а положительный — для более крупных [Mendez et al., 2021].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-17-00125 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>), а также при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Близнецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 46–59.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др. Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. по данным KVERT // Материалы XX региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 8–10.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 г. М.: Наука, 1965. 170 с.
- Ефимов В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П. и др. Применение электростатического флюксметра

ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 4. С. 35–46.

Малкин Е.И., Чернева В.И., Махлай Д.О. и др. Дис-танционные методы наблюдений за извержения-ми вулканов Шивелуч и Безымянный // Вестник КРАУНЦ. Сер.: Физ.-мат. науки. 2023. Т. 43. № 2. С. 141–165. ISSN 2079-6641. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-43-2-141-165>

Руленко О.П. Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков / Автореф. дис. ... кандидата физ.-мат. наук. СПб., 1994. 16 с.

Руленко О.П., Климин Н.Н., Дьяконова И.И., Кирьянов В.Ю. Исследования электризации облаков, создаваемых распылением вулканического пепла // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 17–29.

Руленко О.П., Токарев П.И. Атмосферно-элект-рические эффекты Большого трещинного Толба-чинского извержения в июле–октябре 1975 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1979. № 56. С. 96–102.

Фирстов П.П., Котенко Т.А., Акбашев Р.Р. Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле–июне 2020 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. 46. С. 10–15. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15

Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт Р.И. др. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // Известия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 1. С. 29–37.

Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А. и др. Электризация эруптивных облаков вулкана Шивелуч в зависимости от характера эксплозий // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62. <https://10.31857/S0205-96142019349-62>

Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Фирстов П.П., Бузе-вич А.В. Базовые модели источников вариаций вертикальной компоненты атмосферного электри-ческого поля // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 60–64.

Aizawa K., Cimarrelli C., Alatorre-Ibargüengoitia M.A. et al. Physical properties of volcanic lightning: constraints from magnetotelluric and video observations at Sakurajima volcano, Japan // Earth Planet. Sci. Lett. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.024>

Akbashev R.R., Firstov P.P., Cherneva N.V. Recording of atmospheric electrical potential gradient in the central part of Kamchatka peninsula // E3S Web Conf. 2018. V. 62. P. 1–8. doi.org/10.1051/e3sconf/20186202013

Akbashev R.R., Firstov P.P., Budilov D.I., Zavodevkin I.A. Monitoring the Potential Gradient of the Electric Field

the Atmosphere on the Kamchatka Peninsula and on the Paramushir Island (Kuril Islands) // Conference Materials II International Scientific Conference CAMSTech-II 2021 // Advances in Materials, Systems and Technologies. 2021. Camstech-II-6016. <https://doi.org/10.1063/5.0092738>

Aplin K.L., Bennett A.J., Harrison R.G., Houghton I.M.P. Electrostatics and in situ sampling of volcanic plumes // Chapter 6 – Volcanic ash: Hazard observation and mon-itoring. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 99–113. ISBN: 978-0-081004050

Alois S., Merrison J., Iversen J.J., Sesterhenn J. Contact electrification in aerosolized monodispersed silica mic-rospheres quantified using laser based velocimetry // J. Aerosol Sci. 2017. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2016.12.003

Aplin K.L., Houghton I.M.P., Nicoll K.A. Electrical charging of ash in Icelandic volcanic plumes // XV In-ternational Conference on Atmospheric Electricity, 15–20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A., 2014.

Arason P., Bennett A.J., Burgin L.E. Charge mechanism of volcanic lightning revealed during the 2010 eruption of Eyjafjallajökull // J. of Geophys. Res. 2011. V. 116. B00C03. <https://doi.org/10.1029/2011JB008651>

Behnke S.A., Thomas R.J., McNutt S.R. et al. Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 259. P. 214–234.

Behnke S., Bruning E. Changes to the turbulent kinematics of a volcanic plume inferred from lightning data: Plume turbulence and lightning // Geophys. Res. Lett. 2015. DOI: 10.1002/2015GL064199

Behnke S., Edens H., Thomas R. et al. Investigating the origin of continual radio frequency impulses during explosive volcanic eruptions // J. of Geophys. Res.: Atmospheres. 2018. DOI: 10.1002/2017JD027990

Cimarrelli C., Alatorre Ibargüengoitia M.A., Aizawa K. et al. Multiparametric observation of volcanic lightning: Sakurajima volcano, Japan // Geophys. Res. Lett. 2016. DOI: 10.1002/2015GL067445

Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. V. 64. № 7. P. 817–830. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00085-8

Druzhin G.I., Pukhov V.M., Sannikov D.V., Malkin E.I. VLF–direction finder to investigate natural radio radia-tions // VESTNIK KRAUNTS. Fiziko-matematicheskie nauki. 2019. № 27. V. 2. P. 95–104. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104

- Firstov P.P., Akbashev R.R., Malkin E.I. et al.* Atmospheric electrical effects during a strong explosive eruption of Bezmyanniy volcano (Kamchatka Peninsula, Russia) on December 20, 2017 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). 2021.
- Firstov P.P., Malkin E.I., Akbashev R.R. et al.* Registration of atmospheric–electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka Peninsula (Russia) // Atmosphere. 2020. V. 11. № 6.
http://doi.org/10.3390/atmos11060634
- Firstov P.P., Cherneva N.V., Akbashev R.R. et al.* Atmospheric-electric effects from volcano eruptions on Kamchatka peninsula (Russia) // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2019. 1120874.
doi.org/10.1117/12.2540356
- Girina O.A., Loupian E.A., Melnikov D.V. et al.* Bezmyanniy volcano eruption on December 20 // Current problems in remote sensing of the Earth from Space. 2018. P. 88–99.
- James M.R., Lane S.J., Gilbert J.S.* Volcanic plume electrification – Experimental investigation of fracture charging mechanism // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № B7. P. 641–649.
doi.org/10.1029/2000JB900068
- Lacks D.J., Levandovsky A.* Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems // J. of Electrostatics. 2007. V. 65. № 2. P. 107–112.
doi.org/10.1016/j.elstat.2006.07.010
- Lane S.J., Gilbert J.S.* Electric potential gradient changes during explosive activity at Sakurajima volcano, Japan // Bull. of Volcanology. 1992. V. 54. P. 590–594.
- Malkin E.I., Cherneva N.V., Firstov P.P. et al.* Dirty thunderstorms caused by volcano explosive eruptions in Kamchatka by the data of electromagnetic radiation // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. 946. 012015.
DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012015
- Mather T.A., Harrison R.G.* Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. P. 387–432.
- Mendez Harper J., Cimarelli C., Cigala V. et al.* Charge injection into the atmosphere by explosive volcanic eruptions through triboelectrification and fragmentation charging // Earth and Planet. Sci. Lett. 2021. V. 574.
Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X21004179, DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117162
- Meng Z., Tianjun Zh., Wenmin M., Xiaolong Ch., Jian L., Fei L., Chaochao G.* Volcanoes and Climate: Sizing up the Impact of the Recent Hunga Tonga-Hunga Ha’apai Volcanic Eruption from a Historical Perspective // Advances in Atmospheric Sciences. 2022.
DOI: 10.1007/s00376-022-2034-1
- Miura T., Koyaguchi T., Tanaka Y.* Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima volcano Japan // Bull. of Volcanology. 2002. V. № 64. P. 75–93.
- Mueller S.B., Ayris P.M., Wadsworth F.B. et al.* Ash aggregation enhanced by deposition and redistribution of salt on volcanic ash surfaces in eruption plumes // Sci. Rep. 2017. 7 Article number: 45762.
- Shevtsov B.M., Firstov P.P., Cherneva N.V. et al.* Lightning and electrical activity during the Shiveluch volcano eruption on 16 November 2014 // Nat. Hazard Earth Syst. Sci. 2016. V. 16. P. 871–874.
DOI: 10.5194/nhessd-16-871-2016
- Smitha C.M., VanEaton A.R., Charbonnier S. et al.* Correlating the electrification of volcanic plumes with ash fall textures at Sakurajima Volcano, Japan // Earth and Planet. Sci. Lett. 2018. 492 P. 47–58.
doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.052
- Thomas R.J., Krehbiel P., Rison W. et al.* Lightning and Electrical Activity during the 2006 Eruption of Augustine Volcano // The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska. U.S. Geological Survey. 2007. Ch. 25. P. 579–608.
- Van Eaton A.R., Schneider D.J., Smith C.M. et al.* Did ice-charging generate volcanic lightning during the 2016–2017 eruption of Bogoslof volcano, Alaska? // Bull. of Volcanology. 2020. V. 82.
DOI: 10.1007/s00445-019-1350-5

THE CHARACTERISTIC ELECTROSTATIC STRUCTURE OF ERUPTIVE CLOUDS OF STRONG EXPLOSIVE ERUPTIONS OF THE SHIVELUCH AND BEZMYANNY VOLCANOES (KAMCHATKA PENINSULA)

R. R. Akbashev^{1, 2, *}, E. I. Malkin³, N. V. Cherneva³

¹*Kamchatka Branch, Federal Research Center "Unified Geophysical Service, Russian Academy of Sciences",
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*Kamchatka State University named after Vitus Bering, Pogranichnaya str., 4, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683032 Russia*

³*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Mirnaya str., 7, Paratunka village, Yelizovsky district, Kamchatka region, 684034 Russia*

**e-mail: arr@emsd.ru*

The analysis of the registered variations (anomalies) of the atmospheric electric potential gradient (PG) associated with the spread of eruptive clouds from the eruptions of the Shiveluch and Bezmyanny volcanoes (Kamchatka peninsula) is presented. Anomalies were recorded at different distances from the eruption centers and under different conditions of atmospheric stratification. Such conditions made it possible to show that a volumetric electrostatic structure is formed in the eruptive clouds of the Shiveluch and Bezmyanny volcanoes, which corresponds to the well-known phenomenological model proposed on the basis of studies conducted on various volcanoes of the world. According to this model, a positive volumetric electrostatic charge is formed in the upper part of the eruptive cloud, a negative one in the middle, and a positive one in the lower.

Keywords: explosive cloud, electrification of eruptive clouds, potential gradient of the electric field of the atmosphere, volumetric electrostatic charge