

УДК 551.594

РЕЗУЛЬТАТЫ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ЭБЕКО В ПЕРИОД 2018–2020 гг.

© 2023 г. Р. Р. Акбашев^{a, b, *}, Е. О. Макаров^{a, b}

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

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*e-mail: arr@emsd.ru

Поступила в редакцию 12.10.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

С целью исследований процессов формирования объемных зарядов в эруптивных облаках эксплозий вулкана Эбеко в период 2018–2020 гг. проводились наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы в г. Северо-Курильск. Зарегистрировано 179 случаев, когда распространение эруптивного облака происходило в безоблачных или малооблачных условиях и сопровождалось откликом в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы. Выявлено четыре характерных типа откликов в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы. Показано, что тип регистрируемого отклика определяется условиями распространения эруптивного облака относительно пункта регистрации, а также определяется взаимным расположением зарядов в нижней и верхней областях эруптивного облака на момент регистрации отклика. При этом в эруптивном облаке преобладает отрицательный объемный заряд, который локализован в верхней области эруптивного облака, положительный объемный заряд локализован в нижней области. Данные натурных наблюдений согласуются с результатами численного моделирования.

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

DOI: 10.31857/S0203030623700098, **EDN:** MNQJHP

ВВЕДЕНИЕ

Действующий стратовулкан Эбеко (50°41'20" с.ш., 156°00'54" в.д.) расположен в северной части хребта Вернадского о-ва Парамушир, в 7.4 км к западу от г. Северо-Курильск (рис. 1). По частоте извержений является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги и представляет серьезную опасность для города.

Первые геоморфологические и геологические описания вулкана были опубликованы в работах [Tanakadate, 1936; Gorshkov, 1958]. Постройка вулкана Эбеко имеет максимальную высоту 1156 м над уровнем моря, но не имеет выдающегося и хорошо развитого вулканического конуса. Его низкопрофильное сооружение состоит из нескольких слитых малообъемных андезитовых лавовых куполов. Широкая и довольно плоская вершинная область вулкана занята несколькими перекрывающимися мелкими маарообразными кратерами диаметром 200–300 м (рис. 2).

В работе [Belousov et al., 2021] показано, что извержения вулкана Эбеко охватывает целый ряд механизмов – от чисто магматических до фреатических/гидротермальных и фреатоматических. Длительность извержений, как правило, составляет 2–4 года, а периоды межэруптивной деятельности – 20–30 лет. 19 октября 2016 г. начался новый цикл активности вулкана Эбеко [Walter et al., 2020; Котенко и др., 2018; Гирина и др., 2017; Дегтярев, Чибисова, 2020; Котенко и др., 2019; Рыбин и др., 2017], который продолжается и в настоящее время. Извержения происходят в виде эпизодических эксплозий вулканического типа со значительными вариациями мощности и периодичности [Фирстов и др., 2020].

Во время извержений вулкана формируются эруптивные облака, которые представлены пеплом, аэрозолем и газом. Максимальная высота подъема эруптивной колонны эксплозий достигала 4–5 км н.у.м. (см. рис. 2б). Условия стратификации атмосферы определяют перенос масс

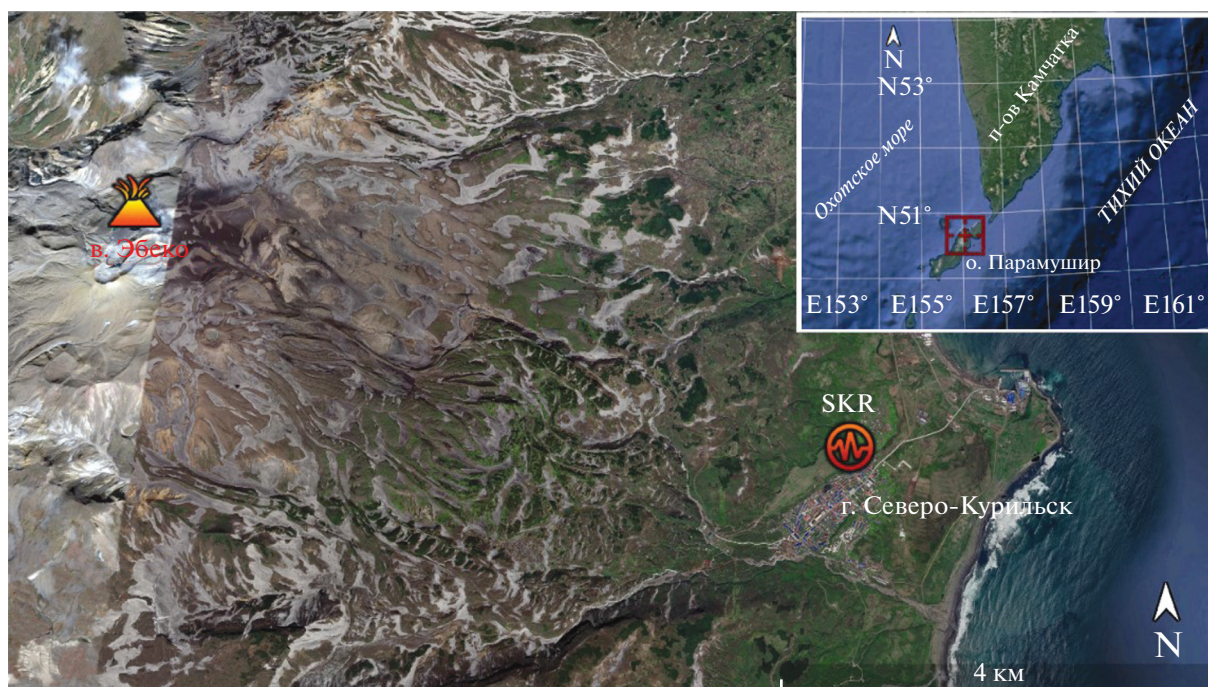


Рис. 1. Географическое положение вулкана Эбеко. На вкладке расположение пункта наблюдений SKR в г. Северо-Курильск.

пепла и газов на различные расстояния. Довольно часто в г. Северо-Курильске, который расположен в 7 км от кратера вулкана, выпадает пепел.

В результате ряда физических процессов, таких как трибоэлектризация, фрактоэмиссия, взаимодействие продуктов извержения с метеорологическими облаками, продукты извержения электризуются. В эруптивном облаке формируются объемные электростатические заряды [Руленко, 1994; Behnke et al., 2013]. Долговременные непрерывные наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) являются экспериментальной основой для исследований электризации эруптивных облаков.

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В 2018 г. в г. Северо-Курильск на базе сейсмической станции SKR Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба” (СФ ФИЦ ЕГС) РАН (см. рис. 1) был установлен аппаратно-программный комплекс на базе аналогового датчика “ЭФ-4” [Ефимов и др., 2013; Акбашев, Фирстов, 2021] для мониторинга V' ЭПА [Akbashev et al., 2018, Akbashev, Firstov, 2019] с целью исследования электростатической структуры эруптивных облаков.

За активностью вулкана Эбеко в КФ ФИЦ ЕГС РАН ведется непрерывное видеонаблюдение¹ (http://www.emsd.ru/video/Ebeko/img_1.jpg), видекамера установлена в SKR (см. рис. 1). Эти

данные являются достаточными для селекции откликов в вариациях V' ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков вулкана Эбеко (см. рис. 2б). В некоторых случаях дополнительно используются данные акустического и спутникового мониторинга, а также данные баллонного зондирования, которое проводится два раза в сутки на метеорологической станции Сахалинского УГМС в г. Северо-Курильск. Данные баллонного зондирования находятся в открытом доступе (<http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/intl2000.wmo>). Оценка максимальной высоты эруптивной колонны выполнена на основании данных видеонаблюдений.

Вариации электрического поля атмосферы отражают множество физических процессов, и в первую очередь эти вариации обусловлены метеорологической обстановкой. Поэтому селекция откликов V' ЭПА, связанных с эруптивными облаками извержений вулкана Эбеко, проводилась в том числе по амплитудной характеристике сигнала по следующему правилу:

$$(A_{an} - A_f)/A_f > 1,$$

¹ Привлечены данные, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-irf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

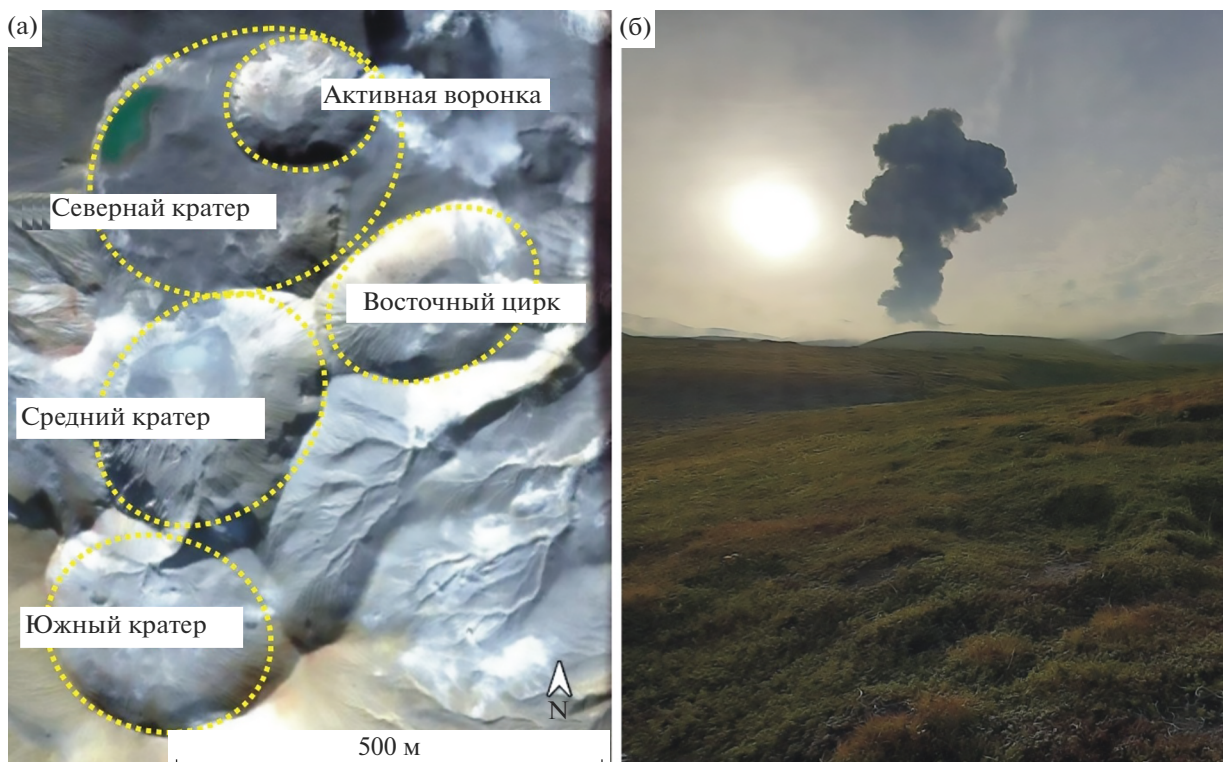


Рис. 2. Схема вершинных кратеров вулкана Эбеко [Рыбин, 2017] (а), пример формирования эруптивного облака в результате извержения Эбеко в 07:11:32 (UTC) 20 августа 2020 г. (б). Фото Р.Р. Акбашева.

где ($A_{an} - A_f$) — абсолютное значение амплитуды отклика V ЭПА, A_{an} — максимальное значение амплитуды зарегистрированного отклика V ЭПА, A_f — фоновое значение вариаций V ЭПА до отклика.

Принятое правило позволило исключить из анализа менее представительные данные откликов V ЭПА от эруптивных облаков. Такие отклики регистрировались в результате относительно слабых (высота подъема эруптивной колонны 1500–2000 м н.у.м.) эксплозий вулкана Эбеко.

Естественно, эксплозии происходили при различных метеорологических условиях. Регистрация отклики V ЭПА происходила как в условиях хорошей погоды, так и в сложных метеорологических условиях, когда эруптивное облако распространялось и взаимодействовало с метеорологическими облаками. Такое взаимодействие могло повлиять на уменьшение заряда эруптивного облака [Климин и др., 1990]. Кроме того, метеорологические облака характеризуются собственными электростатическими зарядами, и в результате регистрируется суммарное наведенное поле от метеорологических облаков и эруптивного облака. Поэтому отклики V ЭПА, связанные с распространением эруптивных облаков в сложных

метеорологических условиях, были исключены из анализа данных.

Для дальнейшего анализа электростатической структуры эруптивных облаков эксплозий вулкана Эбеко необходимо вести параметр форм-фактора эруптивного облака, который будет отражать характеристику эруптивного облака на момент регистрации в SKR (см. рис. 1). Очевидно, что этот параметр определяется, во-первых, мощностью отдельных эксплозий вулкана Эбеко, которая может быть различной, и поэтому максимальная высота подъема эруптивного облака от уровня кратера вулкана может быть от первых сотен метров до первых километров. Во-вторых, форм-фактор определяется ветровой стратификацией на высотах, где распространяется эруптивное облако. На основании данных видеонаблюдения определены следующие характерные типы форм-факторов эруптивных облаков эксплозий вулкана Эбеко.

Тип А. Формируется при средних (2000–2500 м н.у.м.) и сильных (более 2500 м н.у.м.) эксплозиях (градация в рамках параметров извержений вулкана Эбеко). В результате формируется эруптивная колонна с хорошо выраженными верхней и нижней областями (рис. 3а). При этом условия ветровой стратификации атмосферы такие, что возникает боковой снос эруптивного об-

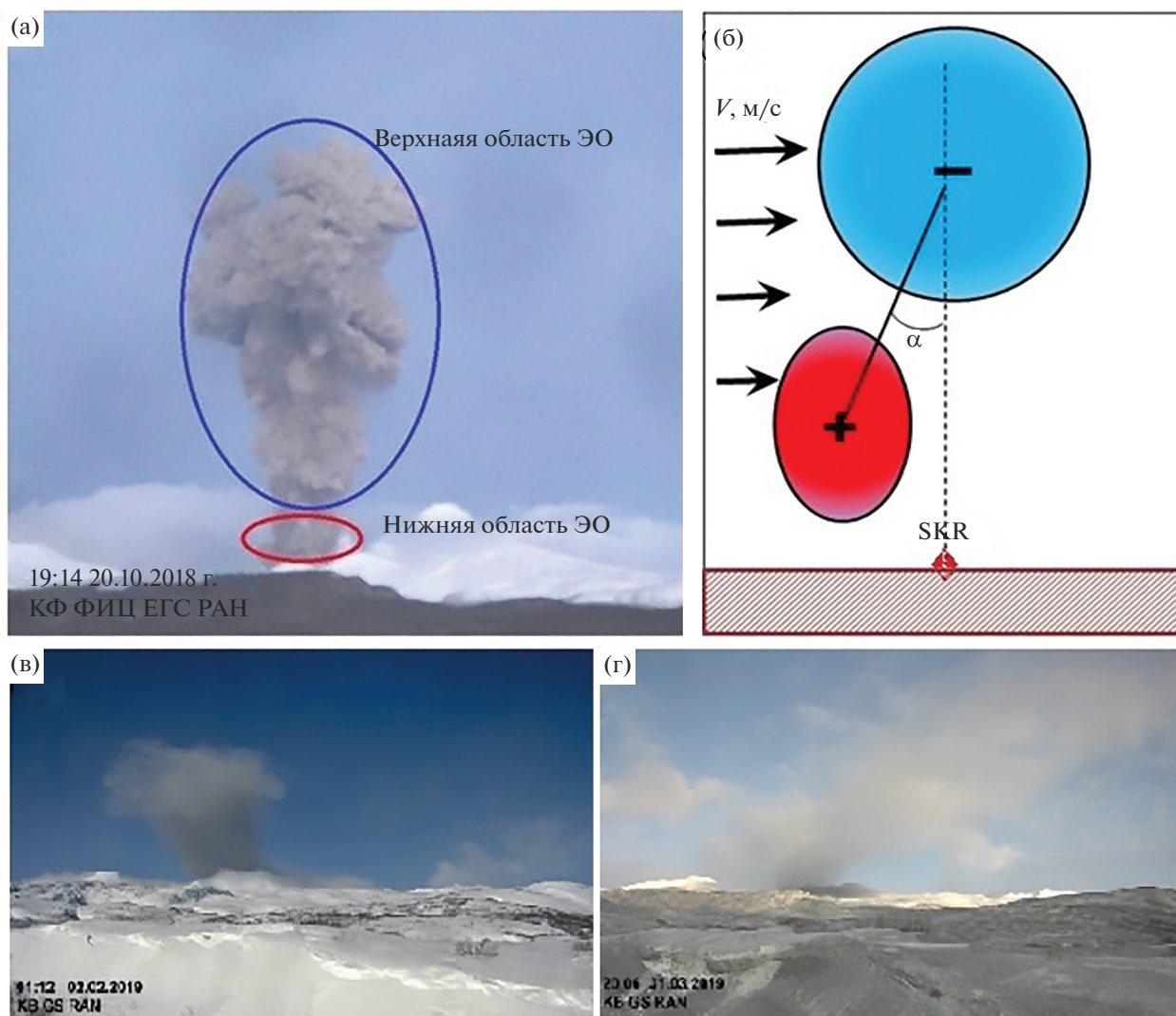


Рис. 3. Типы форм-факторов эруптивного облака.

а – сформированное эруптивное облако с хорошо выраженной верхней и нижней областью; б – форм-фактор типа А, в – схематическое взаимное расположение верхней и нижней областей эруптивного облака на момент регистрации в зависимости от ветровой стратификации атмосферы, угол $\alpha < 35^\circ$ для форм-фактора эруптивного облака типа А, $\alpha > 35^\circ$ для форм-фактора эруптивного облака типа В; в – тип С форм-факторов эруптивного облака; г – тип D форм-факторов эруптивного облака.

лака и, соответственно, на момент регистрации отклика V' ЭПА, взаимное расположение нижней и верхней областей эруптивного облака остается близким к вертикальному, угол α не более 35° .

Тип В. Данный тип по своему генезису аналогичен форм-фактору типа А. Но при этом условия ветровой стратификации атмосферы такие, что на момент регистрации отклика V' ЭПА, взаимное расположение нижней и верхней областей эруптивного облака значительно меняются, увеличивается расстояние между этими областями как по вертикали, так и по горизонтали, угол α более 35° (см. рис. 3б).

Тип С. Характерен для слабых (до 1500 м н.у.м.) эксплозий. В результате формируется “распы-

ленное” эруптивное облако, т.е. без выраженных нижней и верхней областей (см. рис. 3в).

Тип D. Характерен для слабых длительных извержений (продувка), в результате которых формируется протяженный шлейф (см. рис. 3г).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ В SKR

За период с 1 октября 2018 по 1 декабря 2020 гг. в SKR зарегистрировано 179 случаев (рис. 4а), когда распространение эруптивного облака происходило в безоблачных или малооблачных услови-

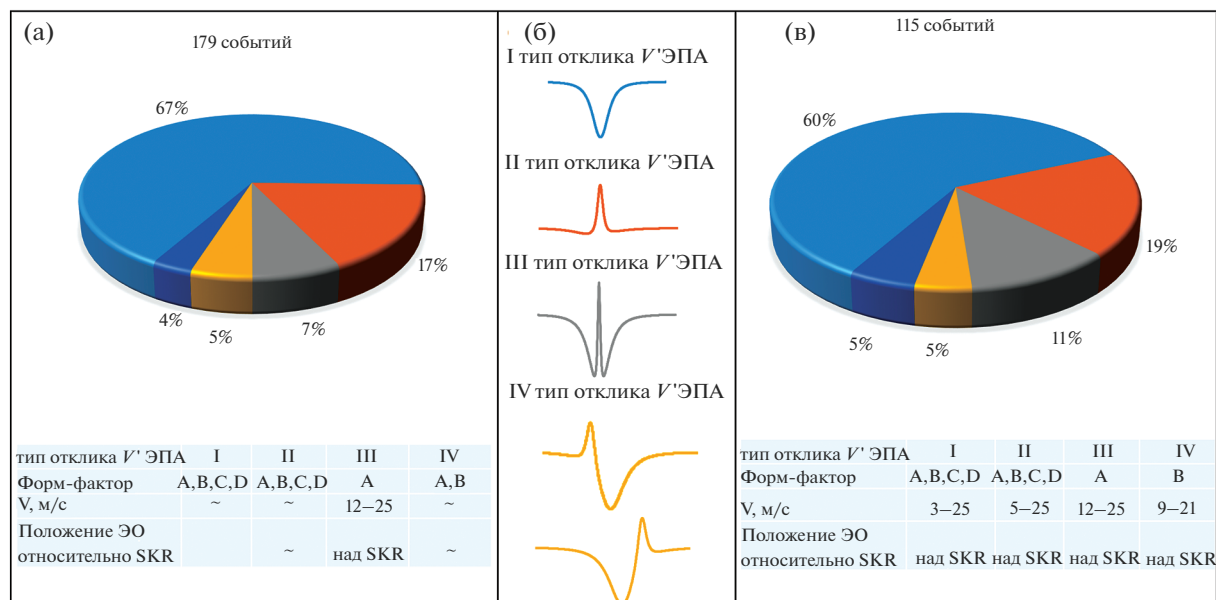


Рис. 4. Сводный анализ данных по регистрации откликов градиента потенциала электрического поля атмосферы (V'ЭПА).

а – данные, зарегистрированные в безоблачных и малооблачных условиях; б – данные, зарегистрированные в тех случаях, когда эруптивное облако распространялось над пунктом наблюдения SKR.

ях и сопровождалось откликом в вариациях V'ЭПА. В результате анализа выделено четыре характерных типа откликов V'ЭПА на распространение эруптивного облака. На рис. 4б представлены идеализированные формы характерных откликов V'ЭПА. Подавляющее число откликов характеризуется отрицательным возмущением – 120 случаев (67%); в 36 (17%) случаях зарегистрированы положительные отклики; 15 (7%) случаев откликов имеют конфигурацию типа “N/P/N” (отрицательный/положительный/отрицательный); в 9 (5%) случаях зарегистрированы дипольные вариации V'ЭПА, при этом в 5 случаях с конфигурацией диполя типа “P/N” и в 4 случаях с конфигурацией диполя “N/P”; в 6 (4%) случаях, когда эруптивное облако распространялось в безоблачных условиях и над SKR возмущение в вариациях V'ЭПА не зарегистрировано.

Для более подробного анализа данных необходимо рассмотреть выборку данных по дополнительному критерию – выбрать те случаи, когда эруптивное облако распространялось над SKR (см. рис. 4в). Это позволяет определить, во-первых, кажущуюся скорость распространения эруптивного облака, во-вторых, проследить взаимосвязь форм-фактора эруптивного облака и наблюдаемого отклика V'ЭПА. Кажущаяся скорость распространения эруптивного облака для представленной выборки рассчитана на основании данных видеонаблюдения с SKR, по которым определя-

лось время начала эксплозии с погрешностью ± 60 с и на основании времени вступления максимума амплитуды отклика V'ЭПА на SKR.

Рассмотрим III тип отклика. На рис. 5 и 6 показаны примеры откликов III типа и соответствующие им этапы распространения эруптивного облака. Из представленных данных (см. рис. 4) видно, что регистрация данного типа отклика возможна только при условии, если:

1. эруптивное облако распространяется строго над SKR или незначительно в стороне от пункта регистрации;
2. эруптивное облако на момент регистрации отклика соответствует форм-фактору типу А;
3. эруптивное облако распространяется со скоростью не менее $\sim 12\text{--}25$ м/с, при этом нижняя и верхняя области эруптивного облака распространяются примерно с одинаковой скоростью.

Такие условия формирования и распространения эруптивного облака способствовали сохранению близко к вертикальной структуре взаимного расположения верхней и нижней областей на момент регистрации отклика.

Далее рассмотрим IV тип отклика. Количество таких случаев для двух выборок различное (см. рис. 4). Это связано с тем, что в случаях, когда эруптивное облако распространялось над SKR, его форм-фактор относился только к типу В (см. рис. 4в), в то время как для общей выборки форм-

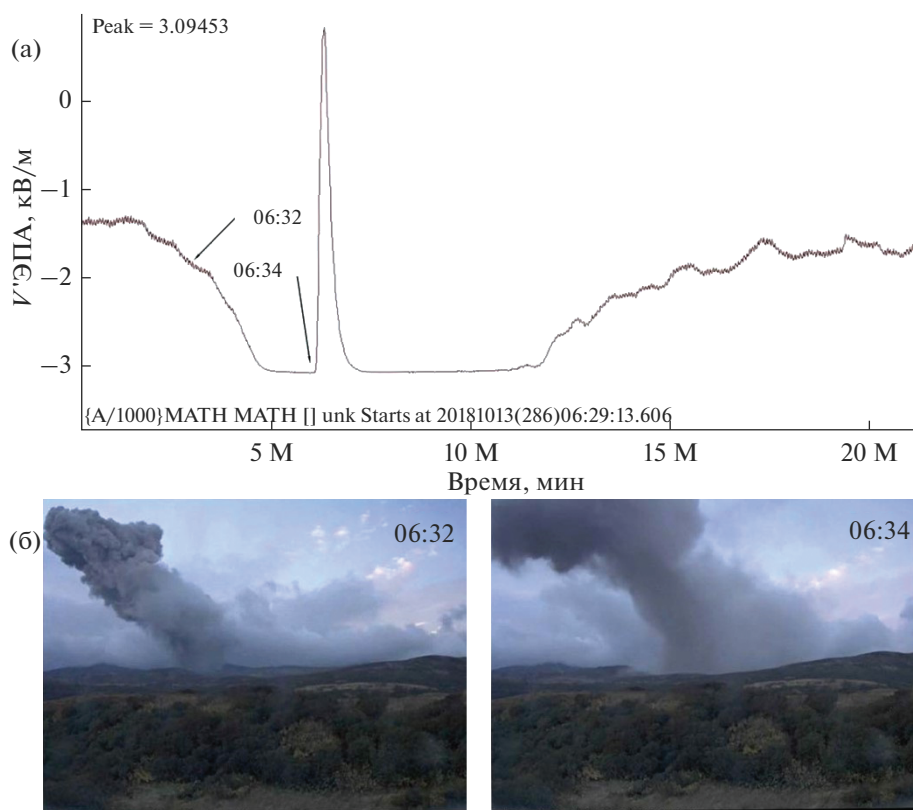


Рис. 5. Пример III типа отклика градиент потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) от эруптивного облака извержения вулкана Эбеко 13.10.2018 г. (а), кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака (б).

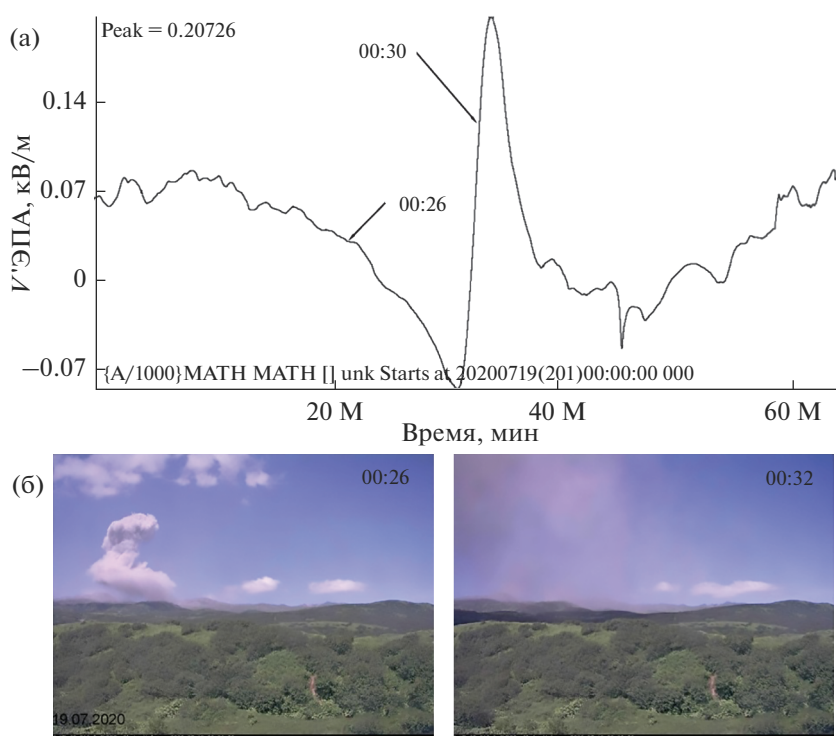


Рис. 6. Пример III типа отклика градиент потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) от эруптивного облака извержения в. Эбеко 19.07.2020 г. (а), кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака (б).

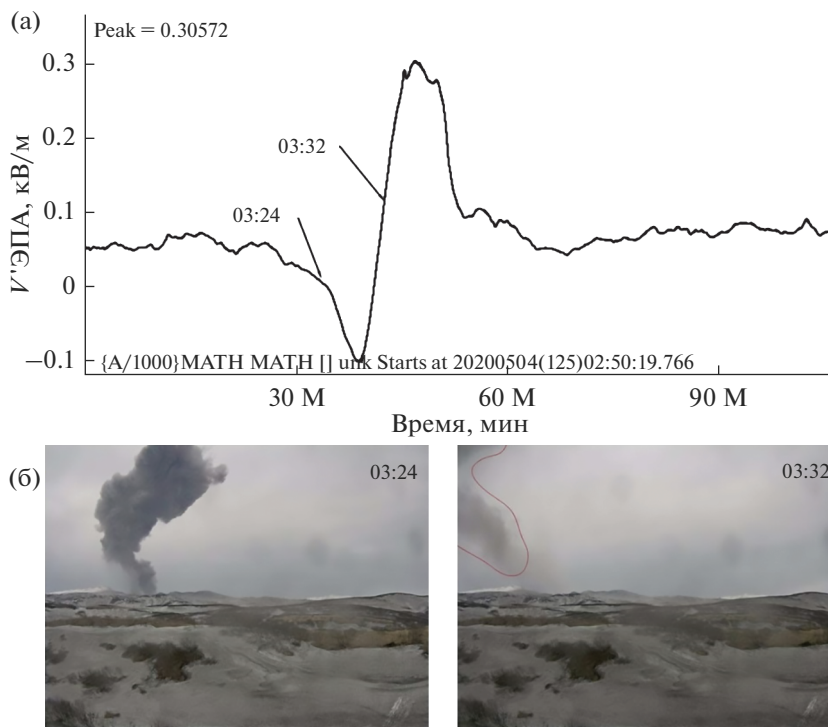


Рис. 7. Пример IV типа отклика градиент потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) от эруптивного облака извержения вулкана Эбеко 4.05.2020 г. (а), кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака (б).

фактор эруптивного облака соответствует как типу **A**, так типу **B** (см. рис. 4а). IV тип отклика при форм-факторе эруптивного облака типа **A** регистрировался в тех случаях, когда эруптивное облако распространялось таким образом, что его нижняя область не проходила над SKR. На рис. 7 и 8 показаны примеры откликов IV типа и кадры распространения соответствующих эруптивных облаков. Конфигурация откликов IV типа может быть “P/N” или “N/P”. Последовательность отклика продиктована условиями ветровой стратификации атмосферы и, соответственно, условиями распространения эруптивного облака. Если нижняя область эруптивного облака распространяется быстрее, чем верхняя, то регистрируется конфигурация “P/N”. Когда верхняя область распространяется быстрее, чем нижняя, то регистрируется обратная конфигурация отклика.

Комплексный анализ зарегистрированных данных свидетельствует о преобладающем отрицательном объемном заряде в верхней области эруптивного облака, при локализации положительного заряда – в нижней области эруптивного облака. При этом определяющее значение для форм-фактора эруптивного облака на момент регистрации отклика является ветровая стратификация атмосферы, в результате которой контро-

лируется взаимное положение верхней и нижней областей эруптивного облака, которое определяется расстоянием между центрами верхней и нижней областей эруптивного облака и выражается в значении угла α .

Регистрация только положительного или только отрицательного отклика для случаев, когда эруптивное облако имело форм фактор типа **A** и **B**, является следствием взаимного расположения объемных зарядов в эруптивном облаке. Их суперпозиция на момент регистрации по всей видимости такая, что регистрируется суммарное наведенное поле, характеризующееся одной полярностью.

Прямая взаимосвязь регистрации откликов I и II типа с типами форм-факторов эруптивного облака **C** и **D** не установлена. При таких случаях регистрировались как отрицательные, так и положительные отклики.

Обобщая результаты анализа данных для III и IV типов откликов, можно сделать вывод, что нижняя область эруптивного облака имеет, как правило, положительный заряд, а верхняя – отрицательный (см. рис. 3б). Такое распределение объемных униполярных зарядов в эруптивном облаке можно объяснить известной фенологической особенностью трибоэлектризации, в резуль-

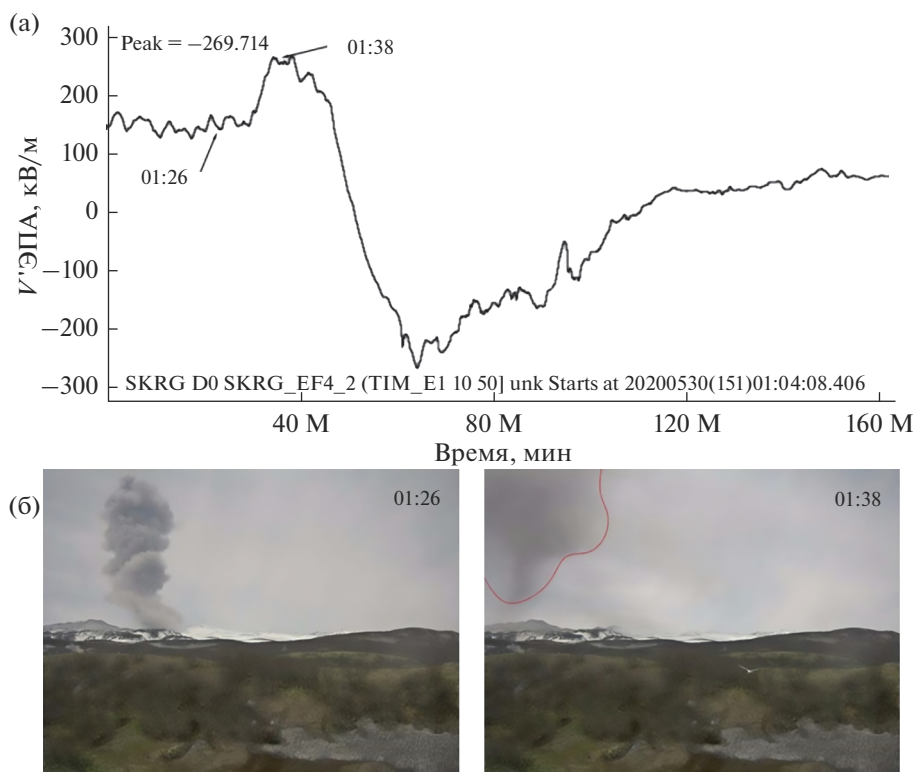


Рис. 8. Пример IV типа отклика градиент потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) от эруптивного облака извержения вулкана Эбеко 30.05.2020 г. (а), кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака (б).

тате которой частицы заряжаются разными знаками в зависимости от их размера, при этом отрицательный заряд характерен для мелких частиц, а положительный – для более крупных [Mendez et al., 2021; Lacks, Levandovsky, 2007]. Такая модель формирования объемных зарядов в эруптивном облаке находит подтверждение по результатам многих натуральных наблюдений на различных вулканах мира [Руленко, 1994; Lane, Gilbert, 1992; Miura et al., 2002], подтверждается и результатами экспериментальных работ [Mendez et al., 2021] и в теоретических работах [Lacks, Levandovsky, 2007]. Тем не менее, формирования объемного положительного заряда в нижней области может быть связано и с другим физическим процессом.

Условия ветровой стратификации атмосферы определяют взаимное пространственное расположение наэлектризованных нижней и верхней областей эруптивного облака, что в свою очередь определяет тип регистрируемого сигнала V' ЭПА. Для подтверждения такой закономерности проведем численное моделирование откликов в вариациях V' ЭПА на распространения эруптивного облака с различными вариантами взаимного расположения в нем верхней и нижней областей.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫХ С РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ

Сосредоточенные на частицах пеплов, аэрозолях и газах, электрические заряды представляют собой объемный электростатический заряд с довольно сложным распределением плотности положительных и отрицательных зарядов в пространстве. При распространении эруптивного облака его электростатическая структура непрерывно эволюционирует. В результате эоловой и гравитационной седиментации продуктов извержения, а также их взаимодействия с воздухом, в эруптивном облаке формируются объемные униполярные заряды. Имея записи V' ЭПА и зная параметры распространения эруптивного облака, можно судить о локализации характерных объемных электростатических структур в нем и об изменении распределения электрических зарядов в эруптивном облаке.

Далее важно “условиться” о связи вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы (E_z) и V' ЭПА. В работах по атмосферному электричеству встречаются различные

подходы к данному вопросу, согласно правилу, эти величины отличаются по знаку. В настоящей работе принят следующий подход, характерный для задач электростатики: вектор напряженности ЭПА направлен от положительного знака к отрицательному, а оси координат соответствуют этому направлению. Согласно этому положению \vec{E}_z будет иметь направление сверху вниз (от положительно заряженной ионосферы к отрицательно заряженной Земле) и, таким образом, будет соответствовать V' ЭПА по знаку.

Наиболее простая модель расположения объемных электростатических зарядов в эруптивном облаке на этапе его максимального подъема и распространения следующая: объемная электростатическая структура в эруптивном облаке заменяется двумя эффективными точечными зарядами q_1 и q_2 , расположенными на оси z и на высотах h_1 и h_2 соответственно. На рис. 9 представлена схема расположения точечных зарядов и система координат. Величина эффективных зарядов и их расположение зависят от условий ветровой стратификации. Полагая, что земля – идеальный проводник, учтем поле индуцируемых в ней зарядов, которое эквивалентно полю электрических изображений зарядов q_1 и q_2 (см. рис. 9). Тогда на поверхности земли ($z = 0$) отличная от нуля будет только вертикальная компонента напряженности электрического поля, которая соответствует выражению [Чернева, Фирстов, 2018; Адушкин и др., 2018]:

$$E_z = \frac{q_1 h_1}{2\pi\epsilon_0 R_1^3} + \frac{q_2 h_2}{2\pi\epsilon_0 R_2^3}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, R_1, R_2 – расстояние от SKR до заряда q_1, q_2 .

Основными параметрами, влияющими на тип отклика, который регистрируется на момент распространения эруптивного облака в SKR, будут углы α_1, α_2 и эффективное расстояние d между центрами объемных электростатических зарядов. Параметры углов α и расстояния d в конфигурации объемных зарядов эруптивного облака, контролируются условиями ветровой стратификации атмосферы и, следовательно, определяются вектором скорости \vec{v}_1, \vec{v}_2 на высотах распространения h_1 и h_2 эффективных электростатических зарядов q_1 и q_2 (см. рис. 9). При условии, что SKR расположен на расстоянии S на оси Ox согласно схеме на рис. 9, выражение (1) примет вид:

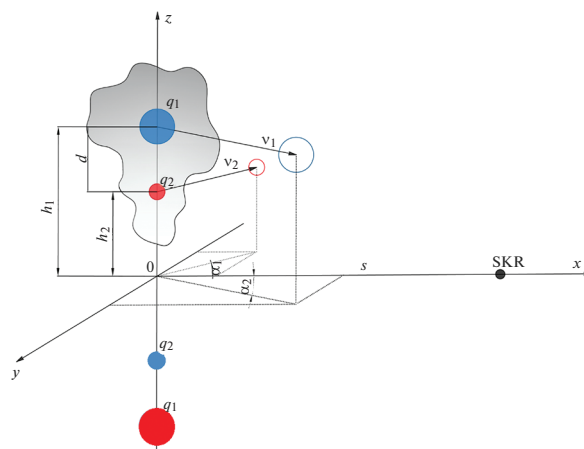


Рис. 9. Схема распределения точечных эффективных электрических зарядов в эруптивном облаке извержений вулкана Эбеко на стадии его распространения в условиях ветровой стратификации атмосферы.

$$E_z(t) = \frac{q_1 h_1}{2\pi\epsilon_0 \left((S - v_1 t \cos \alpha_1)^2 + (v_1 t \sin \alpha_1)^2 + h_1^2 \right)^{3/2}} + \frac{q_2 h_2}{2\pi\epsilon_0 \left((S - v_2 t \cos \alpha_2)^2 + (v_2 t \sin \alpha_2)^2 + h_2^2 \right)^{3/2}}. \quad (2)$$

Математическое моделирование сложных природных процессов всегда имеет некоторые допущения. В рассматриваемом случае предполагается, что эффективные точечные заряды, сформированные в нижней и верхней областях эруптивного облака, не меняются со временем. Это не отражает реальной картины эволюции аэроэлектрической структуры облака, так как зарядение продуктов извержений, рекомбинация и релаксация зарядов определяется рядом физических процессов, протекающих непрерывно с момента начала взрывного процесса. Однако такой подход позволяет качественно показать, как распределены объемные электростатические заряды в эруптивном облаке и дать оценку заряда на момент распространения эруптивного облака в зоне регистрации пункта наблюдения.

В качестве примера математического моделирования рассмотрим взрывное извержение, произошедшее 10.10.2019 г. в 19:14 UTC на вулкане Эбеко. Эруптивное облако от этого извержения поднялось на высоту 2000 (± 200) м н.у.м. Расчетные параметры движения зарядов облака для данного случая представлены в табл. 1. На рис. 10 показаны данные регистрации V' ЭПА и расчетная кривая. Корреляция расчетной модели и наблюдаемых данных составляет 0.89. При этом наблюдаются и значительные расхождения форм кривых. Особенно в диапазоне от 800 с, это связа-

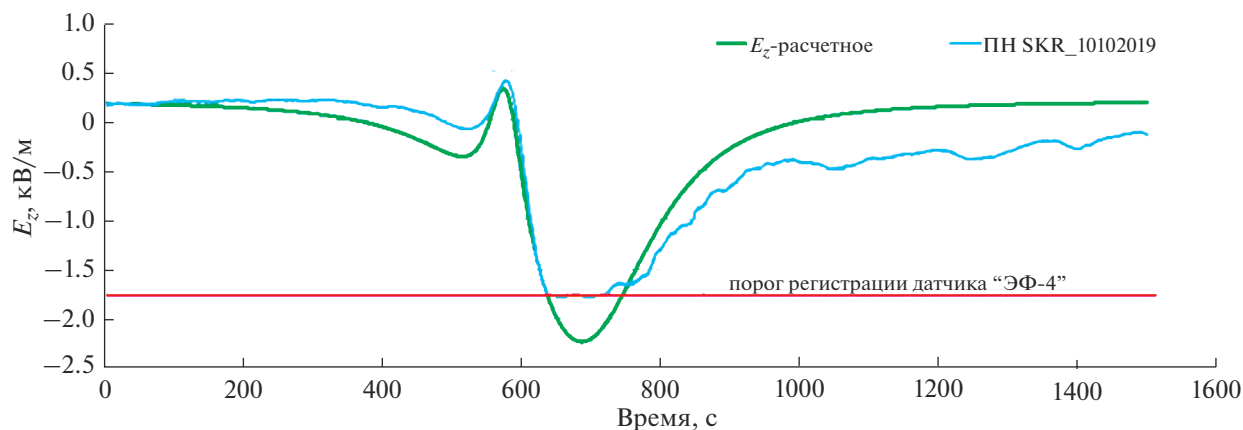


Рис. 10. Расчетная модель отклика E_z , связанного с распространением эруптивного облака над SKR, которое возникло в результате эксплозивного извержения вулкана Эбеко 10.10.2019 г.

Параметры расчетной модели показаны в табл. 1.

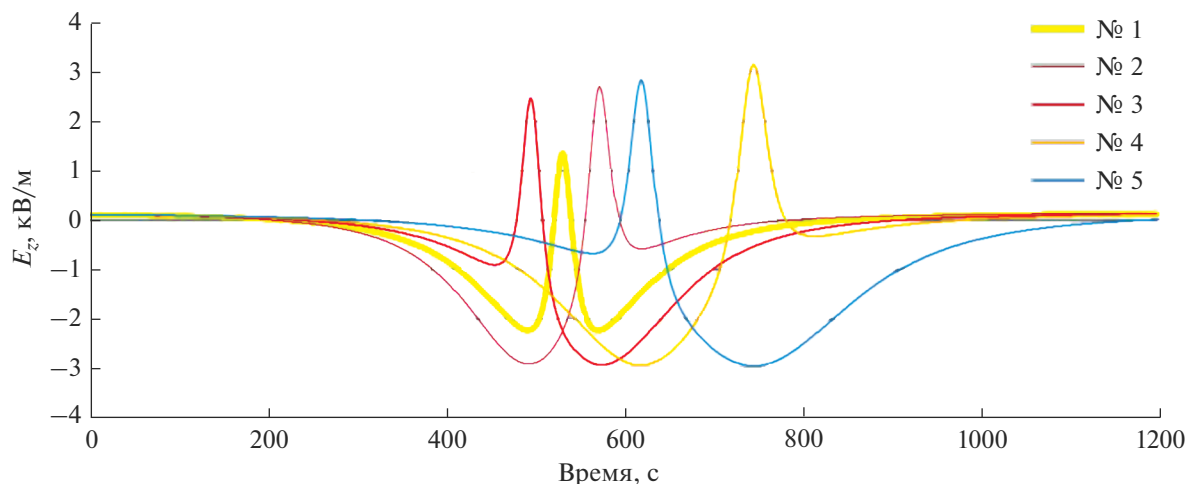


Рис. 11. Формы идеализированных откликов E_z .

Параметры расчетной модели показаны в табл. 2.

но с тем, что в ближней зоне от кратера вулкана при распространении эруптивного облака, как правило, хорошо выделяется передняя область, которая имеет сформированный фронт и область шлейфа, который может растянуться на несколько километров. В связи с этим наблюдается постепенное восстановление напряженности электрического поля атмосферы в SKR.

Далее рассчитаем идеализированные формы откликов согласно схеме распределения зарядов на рис. 9 и на основании выражения (2). Рассмотрим, как будет влиять скорость распространения верхней и нижней областей эруптивного облака на тип регистрируемого сигнала. Входные параметры показаны в табл. 2. На рис. 11 показаны результаты математического моделирования дви-

Таблица 1. Входные параметры моделирования отклика V' ЭПА, связанного с распространением эруптивного облака над SKR, которое возникло в результате эксплозивного извержения вулкана Эбеко 10.10.2019 г.

v_1 , м/с	v_2 , м/с	h_1 , м	h_2 , м	S , м	α_1 , град.	α_2 , град.	q_1 , Кл	q_2 , Кл	$E_{фон}$, кВ/м
10.7	13	1700	500	7486	0	0	-0.45	0.021	0.197

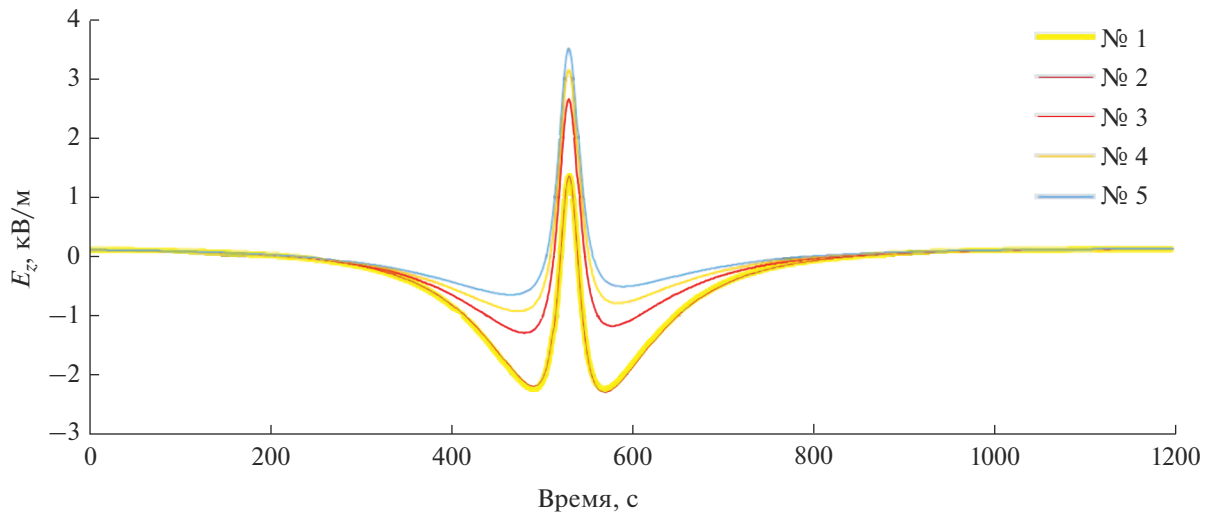


Рис. 12. Формы идеализированных откликов E_z в зависимости от α_1 . Параметры расчетной модели показаны в табл. 3.

жения заряженного диполя с заданными параметрами. Исходя из результатов численного моделирования видно, что скорость распространения нижней и верхней областей эруптивного облака определяет тип зарегистрированного сигнала. Так при равномерном движении эруптивного облака, когда $v_1 = v_2$, будут регистрироваться сигналы III типа (модельная кривая № 1, см. табл. 2).

Таблица 2. Входные параметры моделирования отклика V ЭПА (E_z) в зависимости от скорости распространения эруптивного облака

№	S , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с	h_1 , м	h_2 , м	α_1 , град.	α_2 , град.	q_1 , Кл	q_2 , Кл
1	7458	14	14	1700	250	0	0	-0.5	0.015
2	7458	15	13	1700	250	0	0	-0.5	0.015
3	7458	13	15	1700	250	0	0	-0.5	0.015
4	7458	12	10	1700	250	0	0	-0.5	0.015
5	7458	10	12	1700	250	0	0	-0.5	0.015

Таблица 3. Входные параметры моделирования отклика в зависимости от угла α_1

№	S , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с	h_1 , м	h_2 , м	α_1 , град.	α_2 , град.	q_1 , Кл	q_2 , Кл
1	7458	14	14	1700	250	0	0	-0.5	0.015
2	7458	14	14	1700	250	0.1	0	-0.5	0.015
3	7458	14	14	1700	250	0.15	0	-0.5	0.015
4	7458	14	14	1700	250	0.2	0	-0.5	0.015
5	7458	14	14	1700	250	0.25	0	-0.5	0.015

Когда скорости нижней и верхней областей эруптивного облака различны, наблюдается смещение положительного импульса в отрицательной области сигнала (модельные кривые № 2, 3, см. рис. 11). С увеличением разности скоростей верхней и нижней области эруптивного облака, наблюдается смещение формы регистрируемого сигнала к IV типу (модельные кривые № 4, 5, см. рис. 11), при этом, при $v_1 > v_2$ конфигурация диполя будет соответствовать "N/P" и, соответственно, при $v_2 > v_1$ конфигурация диполя будет соответствовать "P/N".

Рассмотрим, каким образом меняется тип сигнала в зависимости от углов α_1 и α_2 (см. рис. 9). Введение данного параметра позволяет учитывать направление распространения областей эруптивного облака относительно оси OX согласно схеме на рис. 9. Для расчетов рассмотрим модельную кривую № 1 (см. табл. 2, рис. 11) и введем различные конфигурации углов α_1 и α_2 . В табл. 3 представлены входные параметры математической модели с различными параметрами угла α_1 . Угол α_1 контролирует смещение заряда q_1 по оси OY и определяется из выражения $v_1 t \sin \alpha_1$ согласно схеме на рис. 10. На рис. 12 показаны расчетные кривые для различных значений угла α_1 . Таким образом, при увеличении смещения заряда q_1 по оси OY его влияние на сигнал в SKR ослабевает, в результате на пункт наблюдения наводится суммарный положительный импульс, связанный с движением заряда q_2 над пунктом наблюдения.

В табл. 4 представлены входные параметры математической модели с различными параметрами

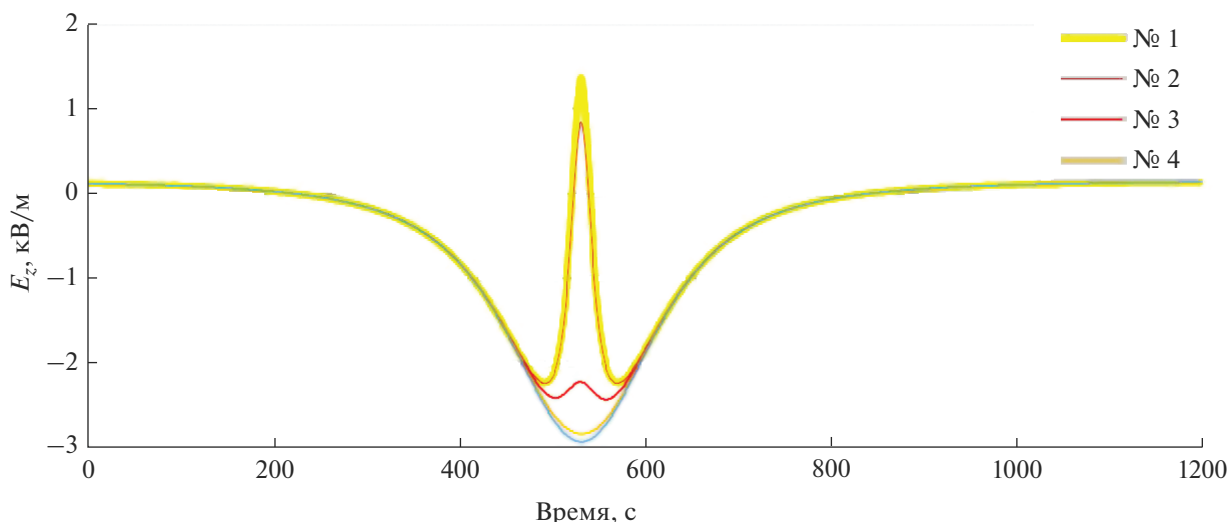


Рис. 13. Формы идеализированных откликов E_z в зависимости от α_2 .
 Параметры расчетной модели показаны в табл. 4.

угла α_2 . Этот угол контролирует смещение заряда q_2 по оси OY и определяется из выражения $v_2 t \sin \alpha_2$ согласно схеме на рис. 9. На рис. 13 показаны расчетные кривые для различных значений угла α_2 . Таким образом, при увеличении смещения заряда q_2 по оси OY его влияние на сигнал в SKR ослабевает, в результате уменьшается положительный импульс, связанный с движением заряда q_2 . Необходимо заметить, что уменьшение влияния заряда q_2 при изменении угла α_2 происходит значительно быстрее, чем уменьшение влияния заряда q_1 при изменении угла α_1 . Этот результат согласуется с натурными наблюдениями, по результатам которых показано, что регистрация III типа отклика V' ЭПА возможна только в тех случаях, когда нижняя область эруптивного облака распространяется над пунктом регистрации вблизи подстилающей поверхности.

Таблица 4. Входные параметры моделирования отклика в зависимости от угла α_2

№	S , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с	h_1 , м	h_2 , м	α_1 , град	α_2 , град	q_1 , Кл	q_2 , Кл
1	7458	14	14	1700	250	0	0	-0.5	0.015
2	7458	14	14	1700	250	0	0.01	-0.5	0.015
3	7458	14	14	1700	250	0	0.05	-0.5	0.015
4	7458	14	14	1700	250	0	0.1	-0.5	0.015
5	7458	14	14	1700	250	0	0.15	-0.5	0.015

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ зарегистрированных данных V' ЭПА за долговременный период наблюдений в SKR (с 1 октября 2018 по 1 декабря 2020 гг.) позволил определить связь выделенных типов сигналов (III и IV) с типом форм-фактором эруптивного облака на момент, когда облако находится в зоне регистрации SKR. При этом конфигурация объемных электростатических зарядов в эруптивном облаке для форм факторов типа А и В следующая: в верхней области сформирован преобладающий объемный отрицательный заряд, в нижней области локализован объемный положительный заряд. Условия ветровой стратификации атмосферы определяют взаимное пространственное расположение нижней и верхней областей эруптивного облака на момент регистрации, что в свою очередь определяет тип зарегистрированного сигнала V' ЭПА. Такие выводы подтверждаются результатами математического моделирования.

На основании результатов долговременных наблюдений V' ЭПА в SKR, был зарегистрирован III тип отклика V' ЭПА, который возможен только тогда, когда эруптивное облако распространяется над пунктом регистрации у поверхности земли, что также подтверждено и при регистрации V' ЭПА в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко [Акбашев, Фирстов, 2021]. По результатам математического моделирования показано, что регистрация III типа отклика V' ЭПА действительно возможна только при условии распространения эруптивного облака над пунктом регистрации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом РФФ 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/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: Геос, 2018. 487 с.
- Акбашев Р.Р., Фирстов П.П.* Феноменологическая модель формирования объемных электростатических зарядов в эруптивных облаках извержений вулкана Эбеко (о. Парамушир) // *Материалы всероссийской конференции “Глобальная электрическая цепь”. Геофизическая обсерватория “Борок”, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Ярославль: Филигрань, 2021. 69 с.*
- Гурина 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.*
- Дегтерев А.В., Чибисова М.В.* Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. // *Геосистемы переходных зон. 2020. № 1. Т. 4. С. 93–102.* <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102>
- 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.*
- Климин Н.Н., Руленко О.П., Дьяконова И.И.* Исследования электризации вулканического пепла при взаимодействии его с каплями воды // *Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 67–75.*
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В.* Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) 2016–2017 гг. // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 32–42.*
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В.* Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) // *Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 187–190.*
- Руленко О.П.* Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков / *Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 1994. 16 с.*
- Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В.* Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 83–88.*
- 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.* <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15>
- Чернева Н.В., Фирстов П.П.* Формирование локального электрического поля атмосферы на Камчатке под влиянием природных процессов. Владивосток: Дальнаука, 2018. 127 с.
- 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.* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186202013>
- Akbashev R.R., Firstov P.P.* The response of the atmospheric electric potential gradient to the ash clouds of v. Shiveluch and v. Ebeko (Peninsula Kamchatka, Island Paramushir, Russia) // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 698: 044042.* <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/4/044042>
- 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.*
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al.* Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // *Bull. of Volcanology. 2021. V. 83. Iss. 4. P. 3–24.* <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
- Gorshkov G.S.* Kurile Islands // *Catalog of Active Volcanoes of the World and Solfataria Fields. 1958. 852 Rome, IAVCEI 7: 1–99.*
- 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. Es. 2. P. 107–112.* <https://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.*
- 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. Science. 2021. Lett. 574. 117–162.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X21004179>. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117162>
- 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.*
- Tanakadate H.* Volcanic activity in Japan during the period between July 1934 and October 1935 // *Japanese J. Astr. Geophys. 1936. V. 13. P. 121.*
- Walter T.R., Belousov A., Belousova M. et al.* The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations // *Remote Sens. 2020. 12. 1961.* <https://doi.org/10.3390/rs12121961>

Results of Long-Term Observations of the Electric Field of the Atmosphere During the Eruption of Volcano Ebeko in the Period 2018–2020

R. R. Akbashev^{1, 2, *} and E. O. Makarov^{1, 2}

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

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

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

In order to study the processes of formation of Volume charges in the eruptive clouds of the eruptions of the Ebeko volcano in the period 2018–2020, observations of the atmospheric electric potential gradient in the city of Severo-Kurilsk were carried out. 179 cases were recorded when the propagation of an eruptive cloud occurred in cloudless or low-cloud conditions and was accompanied by a response in variations of the atmospheric electric potential gradient. Four types of responses in variations of the potential gradient of the electric field of the atmosphere are revealed, it is shown that the type of recorded response is determined by the conditions of propagation of the eruptive cloud relative to the point of registration, and also determined by the relative location of the lower and upper regions of the eruptive cloud at the time of registration of the response. At the same time, the negative volume charge prevails in the eruptive cloud, which is localized in the upper region of the eruptive cloud, the positive volume charge is localized in the lower region. The data of field observations are consistent with the results of numerical modeling.

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