

На правах рукописи

АКБАШЕВ Ринат Рафикович

**АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ,
СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ ПОЛУОСТРОВА
КАМЧАТКА И ВУЛКАНА ЭБЕКО (ОСТРОВ ПАРАМУШИР)**

Специальность 25.00.10—Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Петропавловск-Камчатский, Камчатский край – 2022

Работа выполнена в Камчатском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук" (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

- Научный руководитель: Чернева Нина Володаровна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, с. Паратунка, Елизовский р-н, Камчатский край, ученый секретарь.
- Официальные оппоненты: Аджиев Анатолий Хабасович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик, заведующий отделом стихийных явлений.
Козлов Владимир Ильич, кандидат физико-математических наук, Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 г. в 16 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайтах: www.imgg.ru, www.ikir.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайтах www.imgg.ru, www.ikir.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517,

E-mail: andreeva-mu@mail.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03
кандидат физико-математических наук

М.Ю. Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Во время эксплозивных извержений¹ вулканов формируются эруптивные колонны пирокластического материала, которые могут подниматься до высот тропопаузы и стратосферы [Горшков, 1965; Meng, 2022]. Под влиянием ветровой стратификации в атмосфере формируются эруптивные облака и пепловые шлейфы, которые распространяются на сотни и тысячи км от центров извержений [Гирина, 2017]. В результате трибоэлектризации, фрактоэмиссии и взаимодействия с метеорологическими облаками продукты извержения в эруптивных облаках электризуются [Руленко, 1994; Behnke, 2014]. При распространении эруптивного облака его электростатическая структура непрерывно эволюционирует с формированием объемных электростатических зарядов положительного и отрицательного знаков [James, 2008]. Поэтому эруптивные облака при эксплозивных извержениях являются естественными источниками возмущения постоянного электрического поля атмосферы Земли. Такие возмущения регистрируются в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы [Hatakeyama and Uchikawa, 1951; Руленко и др., 1986], и эти данные являются экспериментальной основой для изучения электризации эруптивных облаков. Исследования процессов электризации эруптивных облаков проводятся в районах активного вулканизма Японии, Италии, США, России и др. с целью оценки рисков для хозяйственной деятельности человека и глобального изменения климата [Meng, 2022].

Районы современного вулканизма на п-ове Камчатка и Курильских о-вах представляют уникальные природные полигоны для исследования современного вулканизма и проявлений электризации эруптивных облаков при эксплозивных извержениях. Экспериментальное и теоретическое изучение электризации продуктов вулканических извержений направлено на установление фундаментальных основ физики электростатических процессов, контролирующих нахождение вулканических аэрозолей, пыли и мелкодисперсного пепла в атмосфере [Esposito, 2016]. Долговременные непрерывные наблюдения за вариациями градиента потенциала электрического поля атмосферы вблизи действующих вулканов во время их эксплозивных извержений с использованием современной аппаратуры, обработка, анализ и комплексная интерпретация таких данных являются актуальными задачами геофизики и вулканологии.

Целью работы является исследование эволюции электростатической структуры эруптивного облака при его распространении в атмосфере, на основании регистрации откликов в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы.

Основные задачи исследования:

1. получение экспериментальных данных вариаций градиента потенциала электрического поля атмосферы для исследования электрической структуры эруптивных облаков, возникающих во время эксплозивных извержений путем создания сети пунктов наблюдений градиента потенциала электрического поля

¹ Извержение вулкана в результате взрыва магматических газов, сопровождаемое выбросом из жерла вулкана больших масс рыхлых продуктов.

- атмосферы вблизи действующих вулканов, на основании этих данных выполнить моделирования процессов, связанных с распространением эруптивных облаков;
2. анализ комплекса данных геофизического мониторинга вулканической активности, спутниковых данных, данных баллонного зондирования с целью выделения возмущений в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы, связанных с распространением эруптивных облаков;
 3. исследование процессов формирования электростатической структуры эруптивных облаков образующихся во время мощных извержений вулканов Шивелуч и Безымянный (п-ов Камчатка) и для менее мощных извержений вулкана Эбеко (о. Парамушир) на основании анализа зарегистрированных откликов в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы;
 4. исследование влияния поверхности земли на формирование объемного электростатического заряда в эруптивном облаке на основании данных наблюдений на вулканах и физического эксперимента по моделированию пепловых облаков с одновременной регистрацией градиента потенциала электрического поля атмосферы;
 5. численное моделирование взаимосвязи динамики отклика градиента потенциала электрического поля атмосферы с особенностями взаимного пространственного расположения сформированных объемных электростатических структур в эруптивном облаке на основе экспериментальных данных, полученных с использованием созданной сети наблюдений;
 6. математическое моделирование зарегистрированных откликов градиента потенциала электрического поля атмосферы, связанных с распространением эруптивного облака.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются эруптивные облака, их электростатическая структура. В качестве предмета исследования рассматриваются временные ряды градиента потенциала электрического поля атмосферы, в которых регистрируются отклики (сигналы) от эруптивных облаков.

Научная новизна

1. Впервые в практике наблюдений за вулканической деятельностью вулканов Шивелуч и Безымянный (п-ов Камчатка) и вулкана Эбеко (о. Парамушир) проведены исследования электростатической структуры эруптивных облаков на основании регистрации откликов в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы на сети станций.
2. Впервые зарегистрированы сигналы в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы, связанные с формированием и распространением эруптивных облаков в ближней зоне от кратера вулкана (по данным наблюдений на вулкане Эбеко), динамика которых характеризуется положительными импульсами в отрицательной области сигнала.
3. Показано, что регистрация отклика с положительным импульсом в отрицательной области сигнала свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде эруптивного облака при локализации положительного объемного заряда в нижней части эруптивного облака.
4. Предложена гипотеза о новом механизме формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака, согласно которому в момент взаимодействия нижней области эруптивного облака с поверхностью склона вулкана происходит перераспределение зарядов за счет контактного взаимодействия частиц пеплов с

поверхностью вулкана. Предложенная гипотеза дополняет известные модели формирования объемных зарядов в эруптивном облаке.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В дальней зоне (50 км и больше) от центров эксплозивных извержений электростатическая структура эруптивных облаков согласуется с известными феноменологическими моделями формирования объемных зарядов за счет эоловой и гравитационной дифференциации продуктов извержения при их распространении.
2. В ближней зоне эксплозивного извержения вулкана Эбеко выделены четыре типа откликов градиента потенциала электрического поля атмосферы от эруптивных облаков, которые определяются взаимной пространственной конфигурацией верхнего отрицательного объемного заряда и нижнего положительного заряда в эруптивном облаке.
3. Для вулкана Эбеко отклик с положительным импульсом в отрицательной области сигнала регистрируется только в том случае, когда нижняя часть эруптивного облака распространяется по поверхности земли в районе пункта наблюдений за вариациями градиента потенциала электрического поля атмосферы, что свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде эруптивного облака при локализации положительного объемного заряда в нижней части эруптивного облака.

Практическая ценность работы

Регистрация градиента потенциала электрического поля атмосферы в приземном слое атмосферы вблизи действующих вулканов позволяет обнаружить присутствие даже слабонасыщенных пеплом эруптивных облаков. Сеть пунктов регистрации градиента потенциала электрического поля атмосферы вблизи извергающихся вулканов дает возможность обнаружения и оценки траектории движения эруптивного облака. Непрерывные наблюдения вариаций градиента потенциала электрического поля атмосферы могут быть одной из составляющих комплексных наблюдений за вулканическими извержениями.

Тематика выполненных исследований соответствует приоритетным направлениям фундаментальных исследований в области наук о Земле: программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы по направлению № 70 «Выяснение механизмов преобразования и взаимодействия физических полей Земли на границе земная кора - атмосфера, оценки корреляционных связей вариаций геофизических полей с барическими вариациями в атмосфере», а также в соответствии с п.1.5.3.4. «Современный вулканизм; изучение состава магм и продуктов вулканических извержений; моделирование физико-химических процессов» Перечня приоритетных направлений Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) 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/>).

Исследования, положенные в основу диссертации, выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-35-00175.

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных, которые получены физически обоснованным общепринятым методом регистрации, хорошим согласованием моделей и соответствием выводам литературных источников.

Апробация работы. Основные результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, были представлены на: VI Сахалинской молодёжной научной школе «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (ИМГиГ ДВО РАН в г. Южно-Сахалинск, 2016 г.); XII Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (Казахстан –Алматы, 2017 г.); IX, X (юбилейной), XI и XII международных конференциях «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, Камчатский край, 2018, 2019, 2020 и 2021 г.); XXIV международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2018 г.); XXI всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», (Борок, 2017 г.); V всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» и I молодежной школе «Проблемы военно-прикладной геофизики, радиолокационного и аэрокосмического зондирования природной среды» (Санкт –Петербург, 2018 г.); VIII Открытой Всероссийской конференции по атмосферному электричеству (г. Нальчик, 2019 г.); V всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (п. Борок, 2021 г.). А также на семинарах и конференциях, проводимых КФ ФИЦ ЕГС РАН, ИВиС ДВО РАН в г. Петропавловске-Камчатском: XVIII, XX региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога в 2015 и 2017 г.; научно-технических конференциях «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» в 2017, 2019 и 2021 гг.

Личный вклад. Автором создана сеть пунктов наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы на полуострове Камчатка и острове Парамушир; аппаратно-программный комплекс регистрации данных и их первичной обработки разработан совместно с м.н.с. Будиловым Д.И. и инж.-иссл. Заводевкиным И.А. Автором выполнена обработка цифровых данных градиента потенциала электрического поля атмосферы. Интерпретация данных выполнена совместно с научным наставником д.ф.-м.н. Фирстовым П.П. Автором проведены полевые работы на вулкане Эбеко и эксперимент по регистрации градиента потенциала электрического поля атмосферы в ближней зоне от кратера вулкана (3 км и 4 км); выполнен физический эксперимент и численное моделирование. Комплексный анализ данных натурных наблюдений градиента потенциала электрического поля атмосферы за период 2018-2020 гг. во время активизации вулкана Эбеко и результатов физического эксперимента и численного моделирования произведен лично автором.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 7 статей в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК (по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых – 5 статей), 11 статей, опубликованных в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 136 страницах, содержит 61 рисунок и 17 таблиц, сопровождается списком литературы из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определены актуальность темы исследований, цель и новизна работы, практическая ценность, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора.

В **первой главе «Электризация эруптивных облаков эксплозивных извержений вулканов»** рассмотрены общие представления об электрическом поле атмосферы Земли [Robel, 1986; Мареев, 2010]. Представлены основные физические характеристики электрического поля атмосферы [Адушкин, 2018]. Рассмотрены атмосферно-электрические эффекты, которые возникают в эруптивных облаках при вулканических извержениях. Представлен обзор инструментальных наблюдений на различных вулканах мира, обзор экспериментальных и теоретических работ, на основании этих работ обобщено современное понимание механизмов электризации эруптивного облака. В выводах главы сформулированы цели и задачи исследований по теме диссертации.

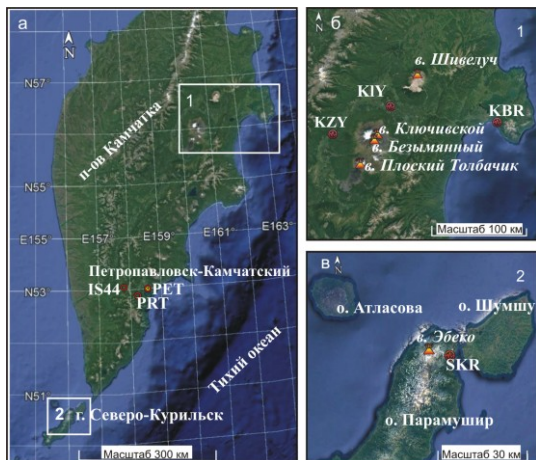


Рисунок 1 – Схема расположения пунктов регистрации V' ЭПА на полуострове Камчатка (верхняя правая панель) и Северных Курилах (нижняя правая панель). KLY расположен в пос. Ключи, KZY – пос. Козыревск, KBR – пос. Крутоберегово, SKR – г. Северо-Курильск, PET – г. Петропавловск-Камчатский, IS44 – инфразвуковая станция, PRT – обсерватория ИКИР ДВО РАН ДВО РАН

комплексном анализе данных: спутникового, сейсмического и акустического мониторинга, видео и визуальных наблюдений, метеорологического мониторинга и баллонного зондирования, а также данных мировой сети регистрации гроз WWLLN [Hutchins et. al., 2012] и данных регистрации гроз ИКИР ДВО РАН [Shevtsov, Akbashev и др. 2015, Malkin, 2021].

В **третьей главе «Вариации градиента потенциала электрического поля атмосферы, обусловленные распространением эруптивных облаков эксплозивных**

Во **второй главе «Район исследования, аппаратура и методика наблюдений»** дана краткая характеристика активности вулканов Шивелуч, Безымянный, приводится описание активности вулкана Эбеко. Дано описание аппаратно-программного комплекса для регистрации градиента потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА), основой которого является флюксметр типа «ЭФ-4» [Ефимов, Акбашев и др., 2013, Акбашев и др., 2015]. На рис. 1 представлена схема пунктов наблюдений V' ЭПА на п-ве Камчатка и о. Парамушир.

В **разделе 2.3** описана методика выделения откликов в вариациях V' ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков, которая основана на

извержений» представлен детальный анализ зарегистрированных откликов от эксплозий вулканов Шивелуч, Безымянный, Эбеко.

В разделе 3.1 дано описание событий, связанных с извержением вулкана Шивелуч, для которых зарегистрированы отклики в I' ЭПА. За период наблюдений 2013 – 2018 г. в KZY, KLY (рис. 1) зарегистрировано 4 события, связанных с мощными эксплозивными извержениями в Шивелуч [Фирстов, Акбашев, 2017, 2019, 2020]. Рассмотрим подробнее событие Ш-3 (табл. 1).

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

Событие	Дата	t_0	KZY			KLY			
			полярность	I' , кВ/м	Δt , мин.	полярность	I' , кВ/м	Δt , мин.	δ , гр/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

Примечание. Δt – длительность возмущения I' ЭПА.

Извержение вулкана Шивелуч 14 июня 2017 г. В этом случае отклик I' ЭПА от эруптивного облака был зарегистрирован в KLY и KZY (50 и 100 км от вулкана). В KLY через ~80 мин после начала извержения зарегистрирован отклик I' ЭПА. Аномалия представлена биполярным сигналом с максимальными амплитудами – отрицательного возмущения 5.9 кВ/м и положительного 4.8 кВ/м. (рис. 2б).

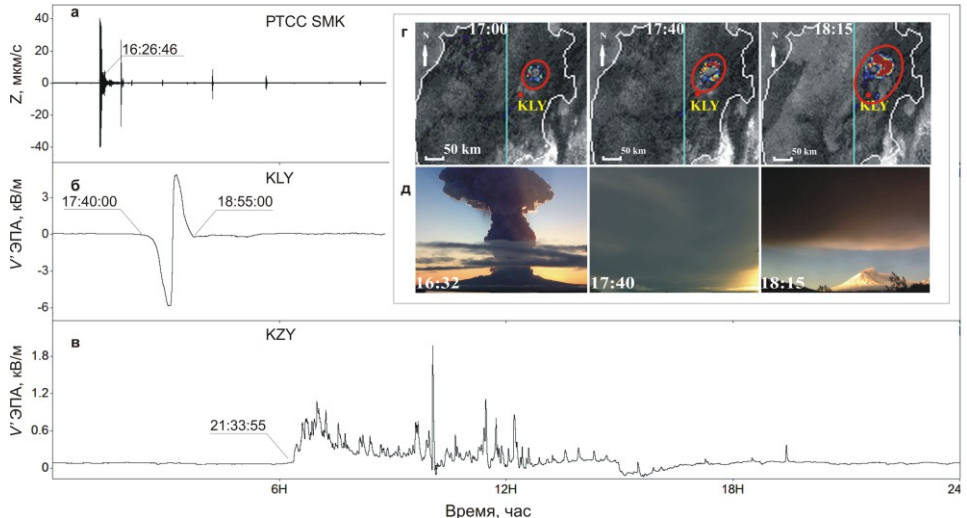


Рисунок 2 – а – Фрагменты записи: скорости смещения грунта вертикальной составляющей на сейсмостанции SMK (56.582 с.ш., 161.468 в.д.); б, в – фрагмент записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY и KZY; г – стадии распространения эруптивного облака по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8; д – данные видеонаблюдений

Согласно базовым моделям по форме сигнала I' ЭПА можно предположить, что заряд эруптивного облака представлял собой наклонный диполь, ось которого определена условиями ветровой стратификации атмосферы и ориентирована вдоль

движения. При приближении эруптивного облака к KLY (рис.1), регистрировалось отрицательное возмущение V' ЭПА, которое отражает суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY, что свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде в эруптивном облаке. В момент прохождения эруптивного облака над KLY с выпадением более крупных частиц пепла было зарегистрировано положительное возмущение в V' ЭПА, что свидетельствует об объемном положительном заряде, который локализован в нижней области эруптивного облака.

На основе данных стратификации атмосферы и кинематических параметров отклика V' ЭПА можно оценить параметры сформированной электростатической структуры. Согласно выполненной оценке на момент распространения эруптивного облака в районе KLY электрическая структура эруптивного облака представлена верхним отрицательным объемным зарядом, равным -26 Кл и нижним положительным зарядом, равным 15 Кл. Расчет произведен согласно формуле (2).

Однополярный сигнал V' ЭПА от шлейфа эруптивного облака в KZY, также как и в первом случае Ш-1 (табл. 1), имел положительный заряд. Продолжительность аномалии была более шести часов с $V'_{max} \sim 2$ кВ/м, изрезанный характер аномалии свидетельствует о сложном распределении плотностей объемных зарядов в эруптивном облаке с преобладающим положительным зарядом (рис. 2в).

В разделе 3.2 дано описание событий, связанных с извержением в. Безымянный.

За период наблюдений 2013 – 2022 гг. в KLY (40 км от вулкана) (рис. 1) зарегистрировано 2 события (табл. 2), связанных с мощными эксплозивными извержениями в. Безымянный [Фирстов, Акбашев, 2021]. В первом случае «Б-1» верхняя, средняя и нижняя области эруптивного облака распространялись в одном направлении. В п. Ключи пепел не выпадал [Girina et al., 2018], в результате распространения эруптивного облака в KLY был зарегистрирован отрицательный отклик в вариациях V' ЭПА, представленный двумя бухтообразными аномалиями (табл. 2), что свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде в эруптивном облаке на момент регистрации отклика.

Таблица 2 – Параметры откликов V' ЭПА, зарегистрированных от эруптивных облаков извержений вулкана Безымянный.

Событие	Дата	t_0 (UTC)	KLY				
			полярность	V' , кВ/м		Δt , мин.	
Б-1	20.12.2017	3:39:24	–	-0.09	-0.08	20	90
Б-2	15.03.2022	12:51:19	+	1.3		75	
							пепел не выпадал

Извержение вулкана Безымянный 15 марта 2022 г. По данным сейсмостанций BZW (55.964° с.ш., 160.496° в.д.), на которой зарегистрировано эксплозивное землетрясение (рис. 4а) следует, что извержение началось в 12:51:19, а 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, его средняя и нижняя области распространялись на высоте 6 - 10 км в север-северо-западном направлении (150°) со скоростью 9 - 12 м/с. По данным Японского метеорологического агентства (ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html), на спутниковых снимках (Himawari-8) хорошо прослеживается развитие верхней и нижней области эруптивного

облака, их распространение согласно ветровой стратификации атмосферы показано на рис. 3 а, б, в. Таким образом, в этом случае над KLY распространялась верхняя область эруптивного облака на высоте тропопаузы и выше.

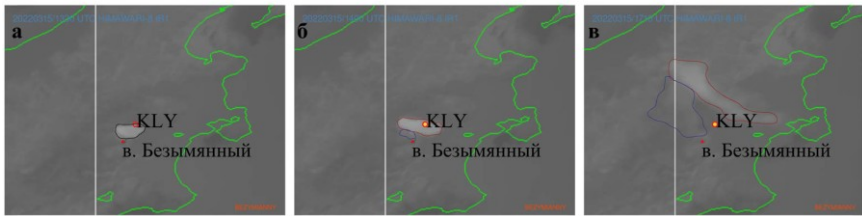


Рисунок 3 – Стадии распространение эруптивного облака по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8: а – развитие эруптивного облака на 13:00; б – 14:00; в – 17:00

В период с 13:30 до 14:30 в вариациях V'' ЭПА был зарегистрирован отклик с положительным возмущением (рис. 4б), который отражает суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY от верхней области эруптивного облака, что свидетельствует о преобладающем в нем положительном заряде на момент регистрации отклика. По формуле (2) оценен заряд эруптивного облака на момент регистрации отклика V'' ЭПА, который составил +12.2 Кл.

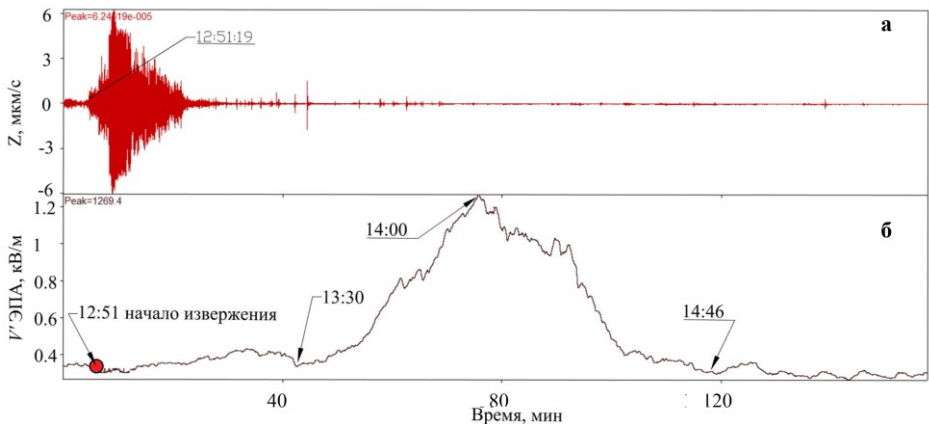


Рисунок 4 – а – Фрагменты записи: скорости смещения грунта вертикальной составляющей на сейсмостанции BZW; б – фрагмент записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY

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, средней и нижней областей эруптивного облака в атмосфере от извержений в. Шивелуч и в. Безымянный. В результате выявлена взаимосвязь зарегистрированных откликов V'' ЭПА с объемными электростатическими зарядами в эруптивных облаках для зарегистрированных событий (табл.1, табл.2.). На основании этих данных показано, что 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 области переносится аэрозолем и газом. При дальнейшем распространении объемные заряды в эруптивном облаке трансформируются в более простые конфигурации, в том числе и в униполярные объемные заряды.

В разделе 3.3 представлены результаты долговременных наблюдений V' ЭПА в г. Северо-Курильск (SKR) (рис.1). Действующий стратовулкан Эбеко высотой 1156 м н.у.м., расположенный на о. Парамушир (рис. 1), по частоте извержений является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги. За период с 1 октября 2018 по 31 декабря 2020 гг. в SKR зарегистрировано 115 случаев, когда эруптивное облако распространялось над пунктом наблюдения SKR, и был зарегистрирован отклик V' ЭПА. По этим данным выделено четыре характерных типа откликов (табл. 3), при этом III тип отклика (рис. 5), который характеризуется положительным импульсом в отрицательной области сигнала, ранее не был описан в литературе.

Таблица 3 – Типы откликов в V' ЭПА, зарегистрированные при распространении эруптивных облаков от извержений вулкана Эбеко за период с 1 октября 2018 г. по 01 декабря 2020 г. в безоблачных и малооблачных условиях над SKR.

тип отклика V' ЭПА	I	II	III	IV		Нет сигнала
Полярность сигнала	"N"	"P"	"N/P/N"	"P/N"	"N/P"	6
Количество случаев	69	22	13	3	2	

В результате комплексного анализа данных были восстановлены кинематические параметры распространения эруптивного облака – определена локализация верхней и нижней областей в облаке на момент регистрации отклика. Показано, что регистрация III типа отклика возможна тогда, когда нижняя и верхняя области на момент регистрации отклика образуют вертикальную структуру или близкую к вертикальной, что определяется условиями ветровой стратификации, при этом нижняя область эруптивного облака распространяется у самой поверхности склона вулкана и проходит через пункт регистрации V' ЭПА. Регистрация IV типа отклика возможна в том случае, когда верхняя и нижняя области эруптивного облака на момент регистрации более растянуты друг относительно друга. При этом регистрация дипольного отклика с конфигурацией "P/N" или "N/P" обусловлена условиями ветровой стратификации, которые определяют взаимное расположение верхней области с отрицательным зарядом и нижней области с положительным зарядом. Регистрация I и II типа отклика также объясняется условиями распространения эруптивного облака относительно пункта наблюдения.

В период с 29.07.2020 по 05.08.2020 гг. были проведены наблюдения V' ЭПА в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко, где были организованы временные пункты наблюдения (ВПН): ВПН₁ был расположен на расстоянии 3.2 км, ВПН₂ – на расстоянии 4.1 км. На ВПН были установлены: электростатический флюксметр типа «ЭФ-4» с регистратором ALMEMO-2590; видеокамера (time lapse camera Brinno-100). ВПН были расположены близко к профилю «кратер в. Эбеко – SKR» (рис. 1). Выбранная расстановка позволила проследить динамику изменения электростатической структуры

эруптивного облака при его распространении. В результате наблюдений было зарегистрировано 24 отклика V' ЭПА, связанных с распространением эруптивного облака. В соответствии с принятой классификацией по табл. 3, выделено три типа характерных откликов: I) бухтообразный, отрицательной полярности, зарегистрировано 17 событий или 71% (рис. 5а); III) бухтообразный, отрицательной полярности и в области минимума наблюдается положительное возмущение импульсного типа, превышающее фоновое значение V' ЭПА – 5 событий (21%) (рис. 5а); IV) биполярный отклик, форма которого, свидетельствует о прохождении горизонтального диполя – 2 события или 8% (рис.5а).

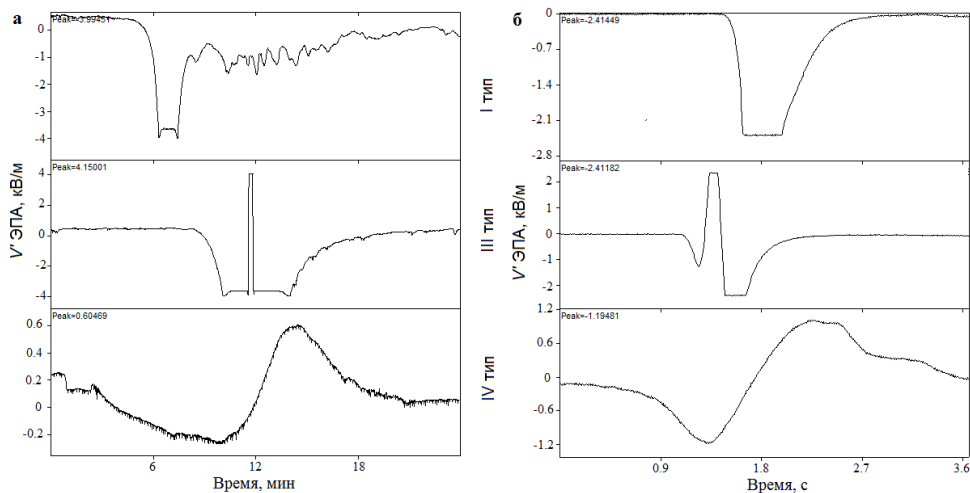


Рисунок 5 – Примеры зарегистрированных откликов V' ЭПА I, III, IV типа: а – по данным наблюдений во время эксплозивных извержений на вулкане Эбеко в ВПН1; б – по данным физического моделирования.

Регистрация III типа отклика в ближней зоне от кратера свидетельствует о сформированной электростатической структуре в эруптивном облаке, в которой выделяются положительно и отрицательно заряженные области. Таким образом, по комплексу зарегистрированных данных для эруптивных облаков эксплозивных вулкана Эбеко, характерна конфигурация объемных зарядов типа negative/positive. При этом в верхней области локализован отрицательный объемный заряд в нижней области – положительный.

В 4 главе «Моделирование электризации эруптивных облаков эксплозивных извержений» представлены результаты физического эксперимента по моделированию пеплового облака, условий его распространения с одновременной регистрацией V' ЭПА. Представлены результаты численного моделирования откликов V' ЭПА в зависимости от условий локализации объемных зарядов эруптивном облаке.

В разделе 4.1 представлены результаты физического эксперимента. Для подтверждения закономерности наблюдаемых откликов в вариациях V' ЭПА в зависимости от условий локализации объемных зарядов в эруптивном облаке, был проведен физический эксперимент по моделированию пеплового облака и условий его

распространения с одновременной регистрацией V' ЭПА. На рис. 6 представлена схема стенда для физического моделирования.

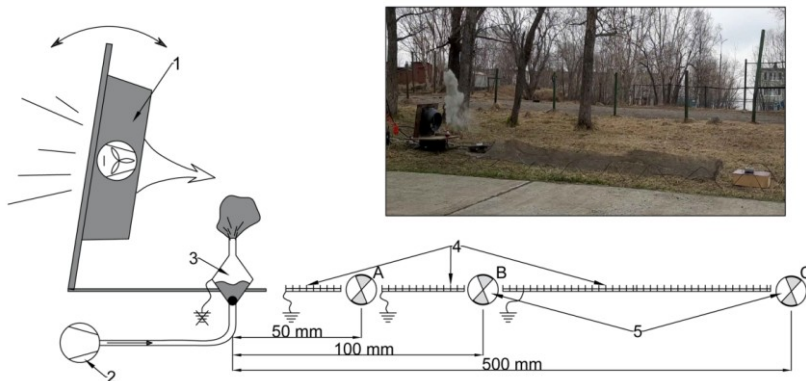


Рисунок 6 – Схема стенда для проведения физического эксперимента по моделированию объемного заряда эруптивного облака и фотография эксперимента. (1) – Вентилятор, имеет регулировку скорости воздушного потока и регулировку угла наклона относительно горизонтали, что позволяет смоделировать направление и скорость распространения пеплового облака; (2) – компрессор, обеспечивает подачу сжатого воздуха в пепловую камеру (3), пепловая камера внутри проклеена алюминиевой лентой и не заземлена; (4) – металлическая сетка, установлена для усиления эффекта наведенной индукции и эффекта перераспределения зарядов при физическом взаимодействии пепла с сеткой, металлическая сетка заземлена; (5) – положение электростатического датчика «ЭФ-4».

Выброс пеплов из камеры происходит за счет подачи в воронку (3) сжатого воздуха от компрессора. Пепел под воздействием давления воздуха из камеры устремляется в узкое горлышко верхней воронки. Такая конструкция значительно повышает трибоэлектрический эффект заряжения пепла. В конце сетки устанавливался электростатический флюксметр: положение А – 0,5 м от пепловой камеры, положение В – 1 м, положение С – 5 м (рис. 6).

Для случаев, когда моделируемое пепловое облако распространялось таким образом, что нижняя область не взаимодействовала с поверхностью (с металлической сеткой), были зарегистрированы отклики V' ЭПА I типа (рис. 5б). Моделирование III типа отклика было возможно только при условии контакта нижней области модулируемого пеплового облака с поверхностью сетки и при условии, когда датчик электрического поля был расположен близко к пепловой камере в позиции А или В (рис. 6). Для моделирования IV типа датчик электрического поля устанавливался в положение С. В этом случае нижняя область пеплового облака взаимодействовала с сеткой значительно дольше, чем при моделировании III типа сигнала. В результате экспериментов был зарегистрирован диполь типа "N/P" (рис. 5б – IV тип), по форме сигнала соответствуют натурным наблюдениям (рис. 5а – IV тип). Кроме того, был зарегистрирован диполь типа "P/N", а также зарегистрированы чисто положительные отклики II типа. Такой набор сигналов связан с кинематикой распространения нижней области пеплового облака относительно его верхней области и относительно пункта регистрации в целом.

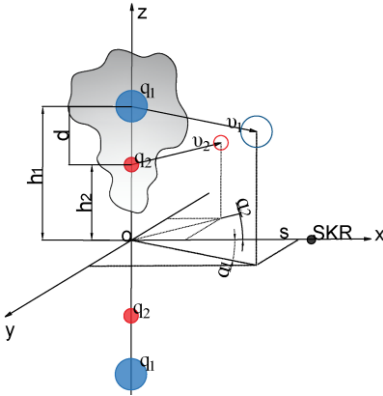


Рисунок 7 – Схема распределения эффективных электрических зарядов в эруптивном облаке извержений вулкана Эбеко на стадии его распространения в условиях ветровой стратификации атмосферы

напряженности электрического поля, которая соответствует выражению [Чернева, 2007, 2018; Адушкин, 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 ; h_1 , h_2 – высота расположения зарядов.

Основными параметрами, влияющими на результат регистрируемого отклика на момент распространения эруптивного облака над SKR, будут углы α_1 , α_2 и эффективное расстояние d между центрами объемных электростатических зарядов. Параметры углов α_1 , α_2 и расстояния d определяются локализацией объемных зарядов в эруптивном облаке и контролируются условиями ветровой стратификации атмосферы и, следовательно, определяются вектором скорости v_1 , v_2 на высотах распространения h_1 и h_2 эффективных электростатических зарядов q_1 и q_2 (рис. 7). При условии, что SKR расположен на расстоянии S на оси ox согласно схеме на рис. 7, выражение (1) для момента времени t примет вид:

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

где S – расстояния от центра кратера вулкана Эбеко до SKR (7.4 км)

В результате численного моделирования условий распространения эруптивного облака рассчитаны идеализированные кривые напряженности электрического поля (E_z) (рис. 8). При изменении v_1 и v_2 , будут зарегистрированы III и IV типы откликов V' ЭПА (рис. 8a). При изменении углов α_1 и α_2 будут зарегистрированы I и II тип откликов V' ЭПА (рис. 8).

В разделе 4.2 представлены результаты численного моделирования откликов V' ЭПА в SKR. 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. 7 представлена схема расположения точечных зарядов и система координат. Полагая, что земля – идеальный проводник [Адушкин, 2018], учтем поле индуцируемых в ней зарядов, которое эквивалентно полю электрических изображений зарядов q_1 и q_2 . Тогда на поверхности Земли ($z=0$) отличная от нуля будет только вертикальная компонента

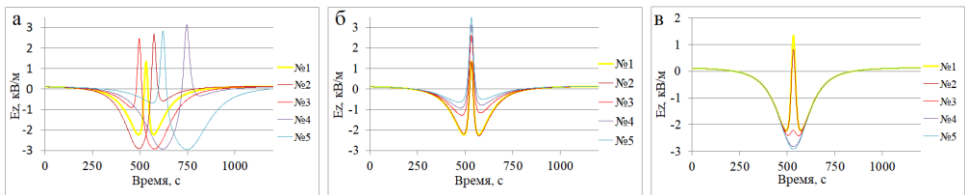


Рисунок 8 – Формы идеализированных откликов E_z . а – отклик в I' ЭПА при изменении скоростей v_1 и v_2 (№1 – 14 м/с и 14 м/с; №2 – 15 м/с и 13 м/с; №3 – 13 м/с и 15 м/с; №4 – 12 м/с и 10 м/с; №5 – 10 м/с и 12 м/с); б – отклик в I' ЭПА при $\alpha_2 = 0$ и изменении угла α_1 (№1 – 0° ; №2 – 0.1° ; №3 – 0.15° ; №4 – 0.2° ; №5 – 0.25°); в – отклик в I' ЭПА при $\alpha_1 = 0$ и изменении угла α_2 (№1 – 0° ; №2 – 0.01° ; №3 – 0.05° ; №4 – 0.1° ; №5 – 0.15°).

Рассмотрим примеры моделирования зарегистрированных откликов I' ЭПА.

10.10.2019 г в 19:14 UTC произошла эксплозивное извержение на в. 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 таблице 4 №1. Результаты расчета по модели представлены на рис. 9а.

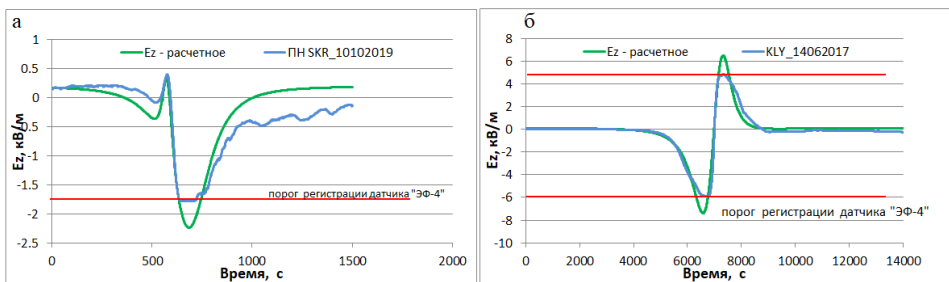


Рисунок 9 – Расчетная модель отклика E_z . а – математическое моделирование отклика, связанного с распространением эруптивного облака над SKR, которое возникло в результате эксплозивного извержения в. Эбеко 10.10.2019 г; б – математическое моделирование отклика, связанного с распространением эруптивного облака над KLY, которое возникло в результате эксплозивного извержения в. Шивелуч 14.06.2017 г

Таблица 4 – Входные параметры моделирования откликов I' ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков над SKR – №1 и KLY – №2, которые возникли в результате эксплозивного извержения в. Эбеко 10.10.2019 г. и в. Шивелуч 14.06.2017 г

№	u_1 , м/с	u_2 , м/с	h_1 , м	h_2 , м	S , м	α_2	q_1 , Кл	q_2 , Кл	$E_{\text{фон}}$, кВ/м
1	10.7	13	1700	500	7486	0	-0.45	0.021	0.197
2	7.35	6.95	5700	4150	50000	0	-26	15	0.01

Рассмотрим эксплозивное извержение, произошедшее 14.06.2017 г в 16:29 UTC на вулкане Шивелуч. Эруптивное облако от этого извержения поднялось на высоту 12000 м н.у.м. В результате в KLY был зарегистрирован отклик в вариациях I' ЭПА (рис. 2б). Расчетные параметры движения зарядов эруптивного облака для данного случая представлены в таблице 4 №2. Результаты расчета по модели представлены на рис. 9б.

Достоверность аппроксимации расчетной модели и наблюдаемых данных составляет 0.89 и 0.87, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным результатом представленной работы является создание сети регистрации V' ЭПА вблизи Северной группы вулканов на п-ве Камчатка и на о. Парамушир вблизи вулкана Эбеко. Пространственное распределение пунктов позволило проследить динамику изменения электростатической структуры эруптивного облака при его распространении. Данные сети V' ЭПА в комплексе с другими геофизическими методами мониторинга активности вулканов обеспечивают возможность детектирования слабо нагруженных эруптивных облаков, которые представлены мелкодисперсным пеплом и аэрозолем, такие облака недоступны наблюдению со спутников. Сеть пунктов регистрации V' ЭПА вблизи извергающихся вулканов дает возможность обнаружения и оценки траектории движения эруптивного облака, получать некоторые оценки размеров вулканического аэрозоля. Важным преимуществом применяемого метода исследований является то, что метод является дистанционным, что важно при исследовании электризации эруптивных облаков для таких вулканов как Шивелуч и Безымянный на которых возможны мощные катастрофические извержения типа «направленный взрыв». Кроме того, данные натурных экспериментов являются основой для исследований физики процессов электризации эруптивных облаков.

Для эксплозий вулканов Шивелуч и Безымянный (п-ов Камчатка) были восстановлены параметры распространения эруптивных облаков, проведен анализ зарегистрированных откликов, показано, что в эруптивном облаке для эксплозий этих вулканов формирование объемных электростатических зарядов соответствует известной модели – positive/negative/positive («P/N/P»). 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 области переносится аэрозолем и газом. Логично, что эруптивное облако в процессе распространения эволюционирует и его электростатическая структура меняется и трансформируется в более простые конфигурации объемных зарядов вплоть до эруптивного облака с униполярным зарядом, что соответствует зарегистрированным в КЗУ (п. Козыревс, ~100 км от вулкана Шивелуч) откликам V' ЭПА с преобладающим униполярным возмущением от эруптивного облака эксплозий вулкана Шивелуч.

В результате многолетней (4 года) непрерывной регистрации V' ЭПА в SKR (г. Северо-Курильск) получен большой массив экспериментальных данных по откликам V' ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков от эксплозий вулкана Эбеко. Выделено 4 характерных типов откликов V' ЭПА, регистрируемых в г. Северо-Курильск: I тип – отрицательные, II тип – положительные, III тип – отклик, который характеризуется положительным импульсом в отрицательной области сигнала, IV тип – дипольные отклики.

Отклик с положительным импульсом в отрицательной области сигнала (III тип) ранее не был описан в литературе. Установлено, что этот тип отклика регистрируется только в том случае, когда нижняя часть эруптивного облака распространяется в прямом контакте с поверхностью земли в районе пункта наблюдений за вариациями градиента

потенциала электрического поля атмосферы. Регистрация такого сигнала на вулкане Эбеко свидетельствует о преобладающем отрицательном заряде эруптивного облака при локализации положительного объемного заряда в нижней части эруптивного облака. Результаты выполненного диссертантом численного моделирования показывают, что регистрация III типа отклика I' ЭПА действительно возможна только при условии, когда нижняя область эруптивного облака распространяется максимально близко к пункту регистрации.

На основании результатов долговременных наблюдений I' ЭПА в пункте SKR и в ближней зоне вулкана Эбеко было выдвинуто предположение о формировании положительного объемного заряда в нижней области эруптивного облака под влиянием двух основных факторов: основной суммарный заряд эруптивного облака отрицательный, который за счет эффекта электростатической индукции наводит на поверхности Земли противоположный заряд – положительный; при боковом сносе эруптивного облака со скоростью более 10 м/с в приграничном слое вблизи поверхности Земли возникает турбулентное движение, этот процесс способствует контактному перезаряджению частиц пеплов от поверхности склона вулкана. В результате этих процессов формируется объемный заряд в нижней области эруптивного облака.

Для подтверждения такого процесса выполнен физический эксперимент по моделированию пепловых облаков с одновременной регистрацией I' ЭПА. В результате выявлено: отрицательное значение I' ЭПА регистрируется во всех случаях, когда пепловое облако не взаимодействовало с поверхностью; III тип сигнала регистрировался только тогда, когда нижняя область пеплового облака взаимодействовала с поверхностью; IV тип сигнала свидетельствует об эволюции III типа сигнала и связан с взаимным пространственным расположением верхней и нижней области пеплового облака на момент регистрации.

Таким образом, предложен новый механизм формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака. Предложенная гипотеза дополняет известные модели формирования объемных зарядов в эруптивном облаке.

Выполнено численное моделирование условий распространения верхней и нижней области эруптивного облака. Взаимное расположение объемных униполярных зарядов в эруптивном облаке на момент регистрации отклика I' ЭПА определяют условия ветровой стратификации атмосферы. В результате рассчитаны «идеализированные» отклики, которые соответствуют выделенным 4 типам отклика I' ЭПА для вулкана Эбеко. Таким образом, показано, что в эруптивных облаках эксплозий вулкана Эбеко преобладает отрицательный объемный заряд, в нижней области эруптивного облака формируется положительный объемный заряд. Взаимная пространственная локализация этих объемных зарядов на момент регистрации отклика определяет тип регистрируемого отклика I' ЭПА.

Выполнено математическое моделирование зарегистрированных откликов для вулкана Эбеко и вулкана Шивелуч. Рассчитывался ряд модельных кривых и по максимуму коэффициента корреляции с экспериментальными (0.89 и 0.87, соответственно) были выбраны наиболее подходящие. С использованием комплексного анализа геофизических, спутниковых и данных баллонного зондирования восстановлены кинематические параметры распространения эруптивных облаков. На

основании этих данных и выбранных модельных кривых проведены расчеты заряда эруптивных облаков, соответствующие значениям на момент регистрации отклика.

Основные публикации по теме диссертации

1. Ефимов, В.А. Применение электростатического флюксметра ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов / В.А. Ефимов, Д.М. Орешкин, П.П. Фирстов, **Р.Р. Акбашев** // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 35-46.
2. Shevtsov, B.M. Lightning and electrical activity during the Shiveluch volcano eruption on 16 November 2014 / B.M. Shevtsov, P.P. Firstov, N.V. Cherneva, R.H. Holzworth, **R.R. Akbashev** // Nat. Hazard Earth Syst. Sci. – 2016. – V. 16. – P. 871–874. doi:10.5194/nhessd-16-871-2016
3. Фирстов, П.П. Электризация эруптивных облаков вулкана Шивелуч в зависимости от характера эксплозий / П.П. Фирстов, **Р.Р. Акбашев**, Н.А. Жаринов, А.П. Максимов, Т.М. Маневич, Д.В. Мельников // Вулканология и сейсмология. – 2019. – №3. – С 49–62. <https://10.31857/S0205-96142019349-62>.
4. Фирстов, П.П. Комплексный мониторинг извержения вулкана Эбеко (о. Парамушир, Россия) в конце 2018 г. – начале 2019 г. / П.П. Фирстов, **Р.Р. Акбашев**, Е.О. Макаров, Т.А. Котенко, Д.И. Будилов, М.А. Лобачева // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – Вып. № 45. – С. 89-99. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-89-99.
5. Фирстов, П.П. Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле–июне 2020 г. / П.П. Фирстов, Т.А. Котенко, **Р.Р. Акбашев** // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – Вып. № 46. – С. 10-15. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15.

Публикации в рецензируемых журналах

1. Фирстов, П.П. Атмосферно–электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. / П.П. Фирстов, **Р.Р. Акбашев**, Р. Холзворт, Н.В. Чернева, Б.М. Шевцов // Известия РАН, ФАО. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 29-37.
2. Firstov, P.P. Registration of atmospheric–electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka Peninsula (Russia) / P.P. Firstov, E.I. Malkin, **R.R. Akbashev**, G.I. Druzhin, Nina V. Cherneva, R.H. Holzworth, V.N. Uvarov, I.E. Stasi. // Atmosphere. – 2020. – V. 11. Is. – 6. <https://doi.org/10.3390/atmos11060634>.
3. Uvarov V. A model to calculate electrostatic charge structure of eruptive clouds from volcanic eruptions / V.N. Uvarov, **R.R. Akbashev**, P.P. Firstov, N.V. Cherneva // E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 196, N. 02001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019602001>.
4. **Akbashev R.R.** The response of the atmospheric electric potential gradient to the ash clouds of v. Shiveluch and v. Ebeko (Peninsula Kamchatka, Island Paramushir, Russia) / **R.R. Akbashev, P.P. Firstov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 698:044042. <https://DOI:10.1088/1757-899X/698/4/044042>.
5. P.P. Firstov. Druzhin Atmospheric electrical effects during a strong explosive eruption of Bezmyanniy volcano (Kamchatka Peninsula, Russia) on December 20, 2017 / P.P. Firstov, **R.R. Akbashev**, E.I. Malkin, N.V. Cherneva, G.I. Druzhin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). – 2021.