

КАМЧАТСКИЙ ФИЛИАЛ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
"ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"

*На правах рукописи*

АКБАШЕВ Ринат Рафикович

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

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискания ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук  
Чернева Нина Володаровна

Петропавловск-Камчатский – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                 | 4  |
| ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ<br>ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ .....                                                                             | 10 |
| 1.1. Общее представление об электрическом поле атмосферы .....                                                                                                 | 10 |
| 1.2. Основные физические характеристики электрического поля атмосферы .....                                                                                    | 13 |
| 1.3. Атмосферно-электрические эффекты, возникающие во время вулканических<br>извержений.....                                                                   | 15 |
| 1.4. Выводы к главе 1 .....                                                                                                                                    | 25 |
| ГЛАВА 2. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА<br>НАБЛЮДЕНИЙ.....                                                                                          | 27 |
| 2.1. Характеристика района исследований и активности вулканов, вблизи которых<br>осуществлялась регистрация <i>V'</i> ЭПА .....                                | 27 |
| 2.2. Регистрации градиента потенциала электрического поля атмосферы .....                                                                                      | 33 |
| 2.2.1. Описание электростатического флюксметра серии «ЭФ- 4» .....                                                                                             | 34 |
| 2.2.2. Результаты сверки электростатических флюксметров «Поле-2» и «ЭФ- 4» ...                                                                                 | 36 |
| 2.2.3. Сеть пунктов мониторинга <i>V'</i> ЭПА на Камчатке и о. Парамушир.....                                                                                  | 41 |
| 2.2.4. Программно-аппаратурный комплекс для сбора и хранения данных .....                                                                                      | 44 |
| 2.3. Методы идентификации возникновения и распространения эруптивных<br>облаков, от эксплозивных извержений вулканов Камчатки и в. Эбеко о. Парамушир<br>..... | 46 |
| 2.3.1. Регистрация эксплозивных землетрясений и волновых возмущений,<br>возникающих во время эксплозий .....                                                   | 47 |
| 2.3.2. Трассирование направлений распространения эруптивных облаков .....                                                                                      | 50 |
| 2.4. Выводы к главе 2 .....                                                                                                                                    | 52 |
| ГЛАВА 3. ВАРИАЦИИ ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ<br>АТМОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ЭРУПТИВНЫХ<br>ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ .....    | 53 |

|                                                                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы на эруптивные облака взрывных извержений в. Шивелуч, п-ов Камчатка.....                     | 53         |
| 3.2. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы от эруптивных облаков взрывных извержений в. Безымянный, п-ов Камчатка.....                 | 66         |
| 3.3. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы от эруптивных облаков взрывных извержений в. Эбеко, о. Парамушир .....                      | 73         |
| 3.3.1. Натурный эксперимент в ближней зоне активного кратера вулкана Эбеко ....                                                                            | 83         |
| Выводы к главе 3 .....                                                                                                                                     | 92         |
| <b>ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ<br/>ВЗРЫВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ .....</b>                                                                | <b>96</b>  |
| 4.1. Эксперимент по физическому моделированию пепловых облаков с<br>одновременной регистрацией градиента потенциала электрического поля<br>атмосферы ..... | 96         |
| 4.2. Математическое моделирование флуктуаций электрического поля атмосферы,<br>связанных с распространением эруптивного облака на стадии плавучести.....   | 107        |
| 4.3. Выводы к главе 4 .....                                                                                                                                | 115        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                                                                                                                    | <b>117</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                                             | <b>120</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Во время эксплозивных извержений<sup>1</sup> вулканов формируются эруптивные колонны пирокластического материала, которые могут подниматься до высот тропопаузы и стратосферы [Meng, 2022; Горшков, 1965]. 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 [Руленко и др., 1986; Natakeyama and Uchikawa, 1951], 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.

---

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

### **Цель и задачи диссертационной работы:**

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:

- 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 атмосферы вблизи действующих вулканов, на основании этих данных выполнить моделирования процессов, связанных с распространением эруптивных облаков;
- 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;
- 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;
- 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;
- 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;
- 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.

### **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 инженером-исследователем Заводевкиным И.А. Автором выполнена обработка цифровых данных градиента потенциала электрического поля атмосферы. Интерпретация данных выполнена совместно с научным наставником доктором физико-математических наук 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.

**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 моделям 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 экспериментальных данных, соответствием наблюдений и выводов литературным данным.

#### **Апробация работы**

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, были представлены на: XII Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (Казахстан – Алматы, 2017 г.); IX, X (юбилейной), XI и XII международной конференции «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 Камчатским Филиалом ФИЦ ЕГС РАН, Институтом Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН в г. Петропавловске-Камчатском и Институтом морской геологии и геофизики в г. Южно-Сахалинске: XIV, XV региональных молодежных научных конференциях «Исследования в области наук о Земле» в 2011 и 2012 гг.; 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.; VI Сахалинской молодёжной научной школе «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» в 2016 г.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 18 статей, в том числе 7 статей в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

### **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.

**Благодарности.** Автор отдает дань уважения и признательности большому Российскому ученому, научному наставнику на протяжении многих лет, доктору физико-математических наук П.П. Фирстову за его высокопрофессиональное руководство при выполнении экспедиционных работ и помощь при осмыслении результатов полученных данных, постоянное внимание к научной деятельности, помощь при проведении исследований и подготовке диссертации. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми был получен ряд научных результатов: Н.В. Черневой, В.А. Ефимову, Е.О. Макарову, Е.И. Малкину, Б.М. Шевцову, В.Н. Уварову, Г.И. Дружину, С.Ю. Хомутову, Д.В. Мельникову, П.М. Нагорскому, Т.А. Котенко; Н.А. Малик – за проведение лабораторных исследований образцов пеплов, Л.В. Котенко – за помощь в организации полевых исследований на вулкане Эбеко, коллективу сотрудников сейсмостанции СФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Северо-Курильск Г.И. Горюновой, Н.А. Марьясовой, Д.Д. Крыловой, Т.А. Кароченко – за помощь в организации пункта наблюдения на сейсмостанции. Автор выражает признательность директору КФ ФИЦ ЕГС РАН, где проводились исследования в течение многих лет, к.ф.-м. Д.В. Чеброву за поддержку работ по мониторингу градиента потенциала электрического поля атмосферы.

## ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ

### 1.1. Общее представление об электрическом поле атмосферы

Электрическое поле атмосферы (ЭПА) было впервые открыто в середине 18 века. Формирование теоретических основ ЭПА связано с такими известными именами как М.В. Ломоносов, Б. Франклин, Ж. Далибар, Г.В. Рихман, Л.Ж. Лемонье и др. [Тверской, 1949; Френкель, 1949; Имянитов, 1962; Чалмерс, 1974]. Ломоносов М.В. на основании проведенных экспериментов предложил основы теории возникновения молний и атмосферного электричества. Он предположил, что появление электрических зарядов в грозовых облаках обусловлено взаимодействием – трением «мерзлых паров» (частичек льда) с окружающим воздухом. При этом разделение зарядов, и, как следствие, возникновение сильных электрических полей в грозовых ячейках, обусловлено мощными вертикальными потоками воздуха в них [Меншуткин, 1947]. Одновременно с Ломоносовым М.В. изучением явлений атмосферного электричества занимался и его друг Рихман Г.В., которым в 1752 г. был впервые использован электрометр для измерений напряженности ЭПА [Чалмерс, 1974].

Лемонье [Lemonnier, 1752] в ходе своих научных изысканий показал, что ЭПА существует и в отсутствии ближних гроз, т.е. в условиях свободной атмосферы при условиях «хорошей погоды» (УХП). Под УХП понимают состояние атмосферы, когда отсутствуют такие метеорологические явления, как облака, туман, пыль, осадки и сильный ветер (скорость ветра  $v < 6$  м/с), такие метеорологические условия исключают сильные возмущения ЭПА. Также Лемонье первым предположил, что электрические эффекты свободной атмосферы имеют суточный ход [Чалмерс, 1974].

В ходе экспедиции на научно-исследовательском судне «Карнеги» (1915-1921 гг.) было установлено, что градиент потенциала электрического поля атмосферы ( $V'$  ЭПА) имеет минимум на экваторе и возрастает к средним широтам [Mauchly, 1926]. Основным результатом измерений  $V'$  ЭПА над океанами на судне «Карнеги» было обнаружение суточного хода с устойчивыми максимумом в ~19 часов, и минимумом в 3 часа по UTC<sup>2</sup>, которые были выделены во время экспедиций в трех океанах (Индийском, Атлантическом и Тихом) [Mauchly, 1926]. Суточная вариация ЭПА, имеющая планетарный характер, была

---

<sup>2</sup> Там, где в тексте время не оговаривается, оно дается по UTC - всемирное координированное время.

названа унитарной (также известна в литературе как «кривая Карнеги»). Измерения  $V'$  ЭПА на территории РФ, проводившиеся Главной геофизической обсерваторией им. Воейкова (1957-1958 гг.), показали, что унитарная вариация  $V'$  ЭПА имеет место и в полярных областях [Парамонов, 1963]. Кроме того унитарная вариация выделяется как в предгорных, так и в высокогорных районах. Так по результатам проведенных исследований на Пиках Чегет (3040 м н.у.м.) и Кызбурун (700 м н.у.м.) выявлено, что суточный ход атмосферно-электрического поля характеризуется наличием минимума (02–04 UT) и максимума (17–19 UT), при этом для летнего периода в высокогорном пункте часто наблюдается дополнительный максимум, связанный с локальными эффектами [Аджиев, 2015, 2020, 2021].

В результате значительного количества непрерывных натуральных измерений ЭПА в УХП, было установлено, что  $V'$  ЭПА имеет положительный знак, что является свидетельством об отрицательном заряде поверхности Земли [Имянитов, 1965; Чалмерс, 1974]. Среднее значение  $V'$  ЭПА у поверхности Земли составляет ~120 В/м на материках, 80-90 В/м над поверхностью океанов [Имянитов, 1962] и ~600 В/м в горных районах [Аджиев, 2015, 2020, 2021].

Поверхность Земли по отношению к воздуху можно рассматривать как идеальный проводник (проводимость морской воды на 14 порядков, а проводимость почвы на 10-11 порядков выше проводимости воздуха). В работе [Wilson, 1920] была предложена одна из первых моделей ЭПА в нижних слоях атмосферы, согласно которой ЭПА обусловлено наличием отрицательных и положительных зарядов на «обкладках конденсатора», роль которых выполняют высоко-проводящая поверхность Земли и ионосферы. Причем в областях с условиями хорошей погоды течет электрический ток, который стремится разрядить конденсатор, а ток зарядки возникает в областях атмосферы, занятых грозовыми облаками.

Таким образом, по современным представлениям в атмосфере действуют глобальные процессы разделения электрических зарядов, которые формируют атмосферно-электрическую цепь. Эти процессы протекают в атмосфере, в ионосфере и магнитосфере Земли и объединены общим понятием – глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) (рис. 1.1). Соответственно под ГЭЦ подразумевают существование распределенного электрического контура с «генераторами», роль которых выполняют планетарные грозовые процессы, и областями с «хорошей погодой», в которых происходит рассеивание энергии ГЭЦ [Mallios, 2012]. Верхней частью контура является ионосфера. Поверхность Земли за счет проводимости играет роль нижней части контура ГЭЦ. Ток проводимости в регионах с «хорошей погодой» возникает из-за того, что атмосферный воздух слабо ионизирован за счет воздействия космических лучей и естественной радиоактивности [Harrison and Carslaw,

2003]. По современным оценкам потенциал между обкладками такого «конденсатора» составляет 180-400 кВ, а суммарный ток проводимости между ионосферой и поверхностью Земли достигает 800-1800 А.

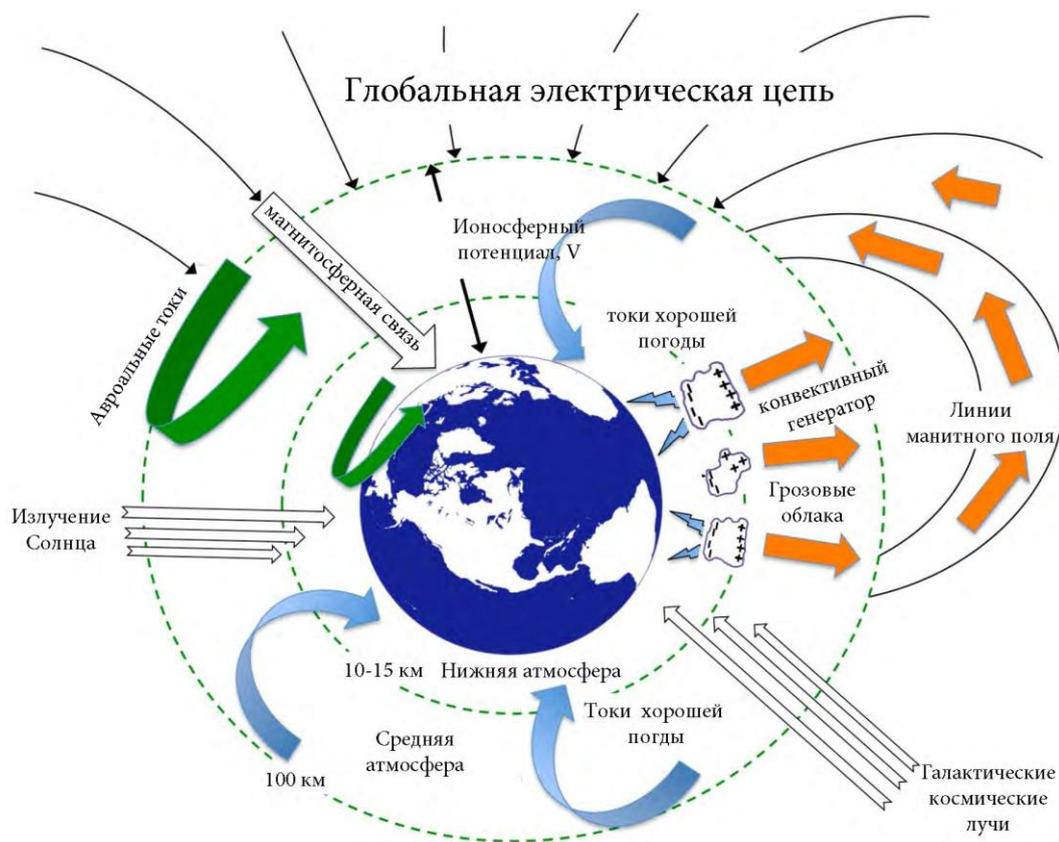


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение глобальной электрической цепи [Адушкин, 2018]

Концепция ГЭЦ является основой для построения теорий ЭПА и поэтому обзорных работ, посвященных проблемам ГЭЦ достаточно много [Robel, 1986; Markson, 2007; Williams, 2009; Мареев, 2010]. Существует целый ряд экспериментальных данных, которые подтверждают существование ГЭЦ. Одним из основных является существование унитарной суточной вариации ЭПА (кривая Карнеги). Электрический ток, который течет из ионосферы к земной поверхности и имеющий постоянную плотность [Gringel, 1986], также подтверждает существование ГЭЦ. Экспериментальное обнаружение близких значений разности потенциалов между земной поверхностью и ионосферой в процессе одновременных измерений в двух точках, разнесённых на глобальные расстояния: Darwin, Northern Territory, Australia (12° ю.ш., 131° в.д.) и Weston, MA, USA (42° с.ш., 1° з.д.) [Markson, 1999], также подтверждает концепцию ГЭЦ.

На Камчатке изучение электрического поля атмосферы началось с 1990 г., когда на обсерватории «Паратунка» Института космофизических исследований и распространения

радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН) был установлен электростатический флюксометр «Поле-2» [Гордюк, 1981] с аналоговой регистрацией [Руленко, 1992, 1996]. В дальнейшем в ИКИР ДВО РАН была создана система для регистрации, хранения и обработки данных  $V'$  ЭПА в цифровом виде [Бузевич, 1998, Смирнов, 2003].

## 1.2. Основные физические характеристики электрического поля атмосферы

ЭПА может быть охарактеризовано в любой его точке значением потенциала  $\varphi$  (В), обусловленного всеми электрическими зарядами, которые имеются как на поверхности Земли, так и в атмосфере. Зная распределение потенциала в атмосфере, можно определить напряженность вертикальной составляющей ЭПА ( $E_z$ ) (В/м). Здесь важно «условиться» о связи  $E_z$  и  $V'$  ЭПА. В областях хорошей погоды  $V'$  ЭПА растет с высотой, а поскольку за положительное направление нормали обычно принимается направление от земной поверхности, то  $E_z$  будет отрицательной. Для того, чтобы исключить отрицательные значения  $E_z$ , вместо этой величины используют  $V'$  ЭПА, эти величины имеют противоположные знаки, так как связаны соотношением:

$$\vec{E}_z = -grad\varphi \quad (E_z = -\frac{d\varphi}{dh}).$$

В работах по атмосферному электричеству встречается и другой подход, характерный для задач электростатики: вектор напряженности ЭПА направлен от положительного знака к отрицательному, а оси координат соответствуют этому направлению. Поэтому, согласно этому положению  $\vec{E}_z$  будет иметь направление сверху вниз (от ионосферы к Земле) и будет соответствовать  $V'$  ЭПА по знаку. В контексте настоящей диссертации принята взаимосвязь, что  $E_z$  соответствует  $V'$  ЭПА согласно задачам электростатики.

Также к физическим характеристикам ЭПА относятся – электропроводность атмосферы  $\sigma$  (удельная электрическая проводимость, См/м), плотность электрического заряда  $\rho$  (Кл/м<sup>3</sup>), плотность электрического тока  $j$  (А/м<sup>2</sup>). Эти характеристики ЭПА являются локальными и зависят друг от друга. Так, плотность электрического заряда  $\rho$  связана с  $V'$  ЭПА уравнением Пуассона, а плотность электрического тока  $j$  связана с  $V'$  ЭПА законом Ома.

Структура ЭПА и динамика изменения этой структуры тесно связана с эффектом ионизации составляющих газов атмосферы Земли под воздействием космических лучей, солнечного излучения, радиоактивного излучения горных пород и радиоактивных газов. В

областях тропосферы, где формируются грозовые облака, мощным ионизатором атмосферы являются молниевые разряды.

В приземном слое атмосферы (часть пограничного слоя атмосферы от земной поверхности до высоты в несколько десятков метро) ионизация в основном связана с радиоактивным излучением горных пород и выходящих из них радиоактивных газов (газообразные изотопы радона –  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  (торон),  $^{219}\text{Rn}$  (актинон) и продукты их радиоактивного распада).

В результате процессов ионизации возникают попарные ионы (положительные, отрицательные). Разделяют легкие ионы, средние ионы, тяжелые ионы. Наличие ионов в атмосфере определяет её проводящую способность. В общем случае, учитывая, что в атмосфере содержатся ионы различных подвижностей, выражение для удельной электрической проводимости следует представлять, как сумму удельных проводимостей всех ионных фракций [Адушкин, 2018]:

$$\sigma = \sum_i e_i k_i n_i,$$

где  $e_i$  – электрический заряд,  $k_i$  – подвижность ионов,  $n_i$  – счетная концентрация ионов  $i$ -й фракции.

Экспериментальные данные и оценки показывают, что электропроводность атмосферы более чем на 95% обусловлена легкими однозарядными ионами, в этом случае выражение для проводимости может быть записано в виде:

$$\sigma = e(n_- k_- + n_+ + k_+)$$

Плотность общего электрического тока равна:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_+ + \mathbf{j}_- = e(n_- k_- + n_+ + k_+) \mathbf{E},$$

где  $k_+$  и  $k_-$  – средние величины подвижностей положительных и отрицательных ионов соответственно,  $n_+$  и  $n_-$  – концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно.

Высотные характеристики скорости ионообразования в атмосфере являются одной из главных причин зависимости электропроводности и напряженности ЭПА от высоты. Электропроводность приблизительно экспоненциально увеличивается с высотой и резко возрастает в ионосфере. Электропроводность у земной поверхности составляет  $\sim 10^{-14}$  См/м, в стратосфере электропроводность увеличивается до  $\sim 10^{-10}$  См/м, а в ионосфере возрастает до  $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$  См/м (педерсеновская проводимость). Проводимость ионосферы на 10 порядков выше проводимости нижних слоев атмосферы. Соответственно, такое различие проводимости позволяет условно выделить в атмосфере две области: нижняя часть

атмосферы (тропосфера, стратосфера) – условно является диэлектриком с переменным значением электрической проводимости и выше – область с высокой проводимостью.

### **1.3. Атмосферно-электрические эффекты, возникающие во время вулканических извержений**

В рамках исследования электризации эруптивных облаков необходимо рассмотреть базовые типы извержений вулканов. Большинство извержений можно разделить на эффузивные и взрывные. Эффузивные извержения сопровождаются излиянием базальтовой магмы с относительно низкой вязкостью и газосодержанием. Для таких типов извержений электризация продуктов извержений незначительная. Взрывные извержения обычно связаны с вязкой магмой с более высоким содержанием газа. Такая магма часто фрагментируется (разрушается) на пирокластические фрагменты разной размерности в результате взрывного расширения газа во время извержения. В более подробных классификационных схемах, основанных на характере извержения, учитывающих физическое состояние магмы, вулканическую активность разделяют на следующие типы: гавайский, стромболианский, вулканский, пелейский, плиннианский. По современным представлениям принята еще более детальная типизация извержений [Раст, 1982], в рамках исследований данной диссертации достаточно принять типы извержений, описанные выше. Исследования электризации эруптивных облаков, проведенные автором, связаны с извержениями вулканов, для которых характерны мощные взрывные эксплозии. Краткая характеристика вулканов, по которым проведены исследования электризации эруптивных облаков, представлена во второй главе диссертации.

Высота эруптивной колонны при эксплозивном извержении может варьировать от нескольких километров для небольших эксплозий до высоты тропопаузы и выше для мощных извержений плиннианского типа [Wilson, 1980]. Так, например, при пароксизмальном извержении, типа направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г., эруптивная колонна поднялась на высоту 35 км [Горшков, 1965], а при извержении вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. высота эруптивной колонны достигла более 30 км [Lynch, 1996].

Эруптивные облака по составу представляют собой трехфазную смесь. Прежде всего, это пирокластика, состоящая из твердых частиц различного гранулометрического состава: раздробленные фрагменты силикатной породы в различных формах, включая кристаллы; стекловидные осколки. Второй составляющей являются вулканические газы, из которых 98%

приходится на пары воды и такие газы как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  и др. Аэрозоль – конденсированные вулканические газы и атмосферные водяные пары представляют третью составляющую в эруптивных облаках [Sparks et al., 1997]. В некоторых случаях могут присутствовать дополнительные твердые частицы в виде солей, если вулканическая активность связана с воздействием лавы на морскую воду, или в виде кристаллов льда при значительной высоте эруптивного облака, когда частицы пеплов выполняют роль ядер конденсации [Rose et al., 1995].

Носителями электростатического заряда в эруптивном облаке являются продукты извержения – вулканический пепел, аэрозоли и газы. При этом до 98% массы всех газов составляет водяной пар [James et al., 2008, Lane et al., 1995, 2011]. По современным представлениям зарядка продуктов извержения обусловлена такими физическими процессами как: фракто-эмиссия, трибоэлектризация и зарядка при взаимодействии эруптивного облака с гидрометеорами.

Фракто-эмиссия – это процесс зарядки продуктов извержения, связанный с фрагментацией магмы в начальный момент извержения, кроме того такой процесс зарядки возможен при инъекции (выбросе) пепло-газовой смеси в атмосферу, на этой стадии извержения частицы вулканического материала заряжаются [James et al., 2000; Mueller et al., 2017]. Процесс фрагментации магмы приводит к испусканию фотонов, электронов, положительных ионов и заряженных частиц [Lane, 2011]. Предполагают, что именно с этим механизмом зарядки связаны множественные кратерные разряды, которые генерируют непрерывный электромагнитный шум (commonly referred to as continual radio frequency or CRF) [Thomas et al., 2007; Behnke et al., 2013, 2014; Behnke and Bruning, 2015; Behnke et al., 2018; Smith et al., 2018; Mendez Harper et al., 2021].

На этапе выброса пепло-газовой смеси из кратера вулкана основным механизмом электризации продуктов извержения становится трибоэлектризация [Hatakeyama and Uchikawa, 1951; Rulenko et al., 1986; Aplin et al., 2014, 2016; Mendez Harper et al., 2016, 2020, 2021]. Трибоэлектризация – это тип контактной электризации, при котором электрические заряды в частицах пепла возникают при их фрикционном контакте (трении) [Duff, 2008; Forward, 2009; Harrison, 2010; Arason, 2007, 2011; Cimarelli, 2014; Houghton, 2013; Méndez, Harper, 2016].

Когда эруптивная колонна достигает максимальной высоты подъема и переходит на стадию распространения эруптивного облака, процессы электризации в нем схожи с процессами формирования объемных электростатических зарядов в метеорологических облаках, когда важным этапом электризации становится формирования градин [Аджиев, Тамазов 1987, Синкевич А.А. 2016], при этом частицы пеплов выполняют роль ядер

конденсации [Arason, 2007, 2011; Van Eaton et al., 2020; Dye, 1988; Herzog, 1998; McNutt, 2010; Arason et al., 2011; Williams, McNutt, 2005].

В мировой практике исследования природы электризации эруптивного облака как фундаментального естественного процесса осуществлялось с использованием следующих методов:

- дистанционное (радиочастотное) обнаружение молниевых разрядов в эруптивном облаке;
- обнаружение отклика в вариациях  $V'$  ЭПА приборами наземного базирования;
- измерение заряда выпадающих из эруптивного облака частиц пепла;
- лабораторные исследования.

Эруптивное облако – это сложная, непрерывно изменяющаяся во времени, объемная электростатическая структура. В такой структуре объемные заряды могут достигать значений пробоя воздуха [Mather and Harrison, 2006]. Поэтому эволюция эруптивного облака, как правило, сопровождается вулканическими молниями и разрядами. О вулканических молниях сообщалось на протяжении тысячелетий [Letters of the Y Pliny, 1963 перевод]. На рис. 1.2 приведены фото вулканических молний, сопровождавших извержения самого «миниатюрного» из действующих вулканов Камчатки (~1600 м н.у.м.) и самого высокого вулкана Евразии – вулкана Ключевского (4750 м н.у.м.). По современным представлениям вулканические молнии и разряды можно уверенно разграничить на: разряды в области кратера; околokraterные молнии; молнии в области сформированного шлейфа на этапе распространения эруптивного облака [James et al., 1998; Thomas et al., 2007; McNutt and Williams, 2010; Arason et al., 2011; Behnke et al., 2013, 2014; Shevtsov et. al., 2016, Cimarelli et al., 2016; Aizawa et al., 2016; Акбашев, 2016; Firstov et al., 2019, 2020; Van Eaton et al., 2020; Mendez Harper et. al., 2021].

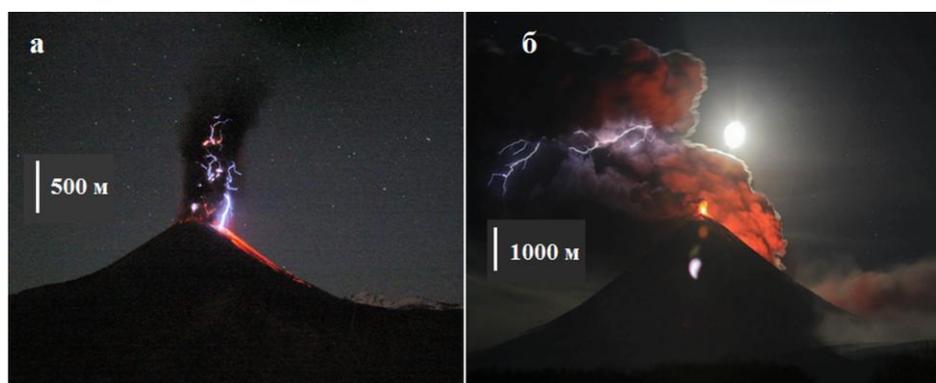


Рисунок 1.2 – Вулканические молнии, зафиксированные при извержениях: а – вулкана Карымского, июнь 2011 г. (фото В.В. Юдина), б - вулкана Ключевского (Камчатка), 11 октября 2013 г. (фото Ю.В. Демянчука)

В зарегистрированных электромагнитных импульсах диапазона ультракоротких волн (30–300 МГц) во время извержений вулканов Аляски Сент - Огастин 11–28 января 2006 г. и Редаут 23–29 марта 2009 г., были выделены три типа молниевых разрядов (рисунок 1.3), происходящих на разных стадиях эксплозивных извержений [Thomas et al., 2007; Behnke et al., 2013]:

I – кратерные разряды, регистрируются на участке газового напора (инжекции пепло-газовой струи) в начальный момент формирования эруптивной колонны, их длительность составляет порядка  $10^{-4}$  с, что соответствует молниевому каналу длиной 10–100 м, эти разряды генерируют широкодиапазонный электромагнитный шум (CRF) [Thomas, 2007; Behnke, 2013; Behnke, 2015; Behnke., 2018; M'endez Harper et al., 2021];

II – дальнейшее развитие эруптивной колонны на автомодельном участке (когда она поднимается за счет тепломассового переноса), сопровождается увеличением униполярных объемных зарядов и увеличение масштаба разделения зарядов, в результате возникают околоратерные молнии, для которых характерен разряд лидера с длительностью 0.01–0.1 с (1–7 км);

III – классические молниевые разряды, аналогичные регистрируемым в метеорологических облаках, появляются, когда эруптивная колонна достигает максимальной высоты подъема и переходит на стадию распространения эруптивного облака (образование шлейфа), при этом длительность электромагнитного импульса более 0.1 с, что соответствует молниевому каналу длиной более 10 км.

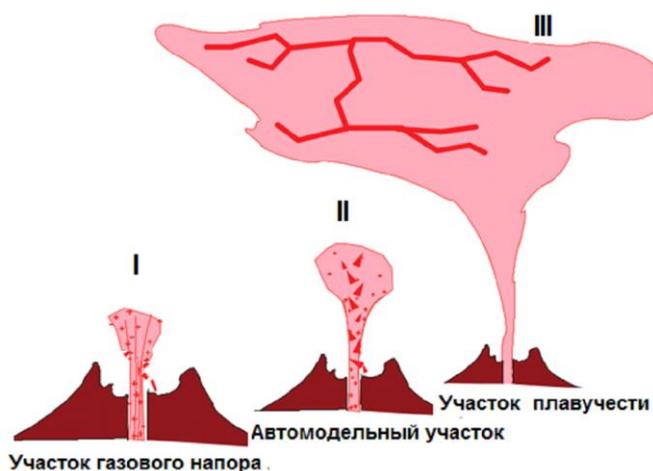


Рисунок 1.3 – Типы молниевых разрядов при эксплозивных извержениях по Behnke et al., 2013

В работе [McNutt, Williams, 2010] ретроспективно анализировалось возникновение вулканических молний на 80 вулканах мира для 212 эксплозивных извержений. Исследовалась связь молниевых разрядов с индексом вулканической эксплозивности

(Volcanic Explosivity Index - VEI<sup>3</sup>). Он был распределен следующим образом: VEI=6 составляли менее 2%, VEI=3-5 составляли 10%, а остальные слабые извержения имели VEI=1-2. Это говорит о большой роли статического электричества при формировании эруптивных облаков даже для слабых извержений и убедительно показывает информативность вулканических молний для извержений с различным индексом VEI. Кроме того, как показано в работе [Bennett, A.J., 2010], в настоящее время регистрация молниевых разрядов при формировании и распространении эруптивного облака является важной составляющей в комплексе методов контроля вулканической активности [Shevtsov, Akbashev, 2016].

Молниевые разряды, связанные с эксплозивными извержениями, можно регистрировать с помощью мировой сети определения месторасположения гроз World Wide Lightning Location Network (WWLLN) с точностью до нескольких микросекунд, что дает возможность определять местоположение разрядов с точностью около километра [Hutchins et. al., 2012]. Поэтому регистрация молниевых разрядов в эруптивных облаках позволяет трассировать их распространение в атмосфере [Arason P et. al., 2011; Behnke, 2013; Shevtsov et. al, 2016; Firstov et al. 2019,2020]. Для более детальных исследований необходимы локальные комплексы регистрации молниевой активности. На п-ве Камчатка данные исследования реализуются в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН) совместно с Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) [Firstov et al. 2019, 2020]. Молнии и разряды, сопровождающие развитие эруптивного облака, свидетельствуют о физических процессах, в результате которых происходит формирование и разделение объемных электростатических областей с униполярными зарядами.

Первые прямые измерения заряда, переносимого оседающими пепловыми частицами, были проведены во время серий извержений на вулкане Сакураджима (Япония) с помощью «чаши Фарадея» [Gilbert et al., 1991]. Было определено, что частицы пеплов могут нести как положительные, так и отрицательные заряды, величина которых равнялась  $\sim 10^{-5}$  Кл·кг<sup>-1</sup>. Была оценена плотность поверхностного заряда при допущении, что частицы пепла имеют сферическую форму, которая составила  $\sim 2.6 \cdot 10^{-5}$  Кл·м<sup>-2</sup>. Это значение близко к теоретическому максимуму –  $3 \cdot 10^6$  В·м<sup>-2</sup>, выше которого происходит пробой воздуха. Эти работы были выполнены на расстоянии 10 км от кратера вулкана, что свидетельствует о сохранении заряда на частицах пеплов.

---

<sup>3</sup> VEI – показатель вулканической эксплозивности. Диапазон выброшенного материала менее 0.0001 <VEI=1<0.001км<sup>3</sup>; 10 <VEI=6 < 100 км<sup>3</sup>.

Первые исследования электризации эруптивного облака с целью изучения их объемной электрической структуры начали проводить при извержениях вулканов Японии, во время которых регистрировались отклики в  $V'$ ЭПА при распространении эруптивного облака от извержений вулкана Асама и вулкан Якеяма (о. Хонсю, Япония). Полученные результаты показали неоднозначность полярности преобладающих зарядов. В некоторых случаях наблюдались возмущения отрицательной полярности с амплитудой  $V'$ ЭПА = 5 кВ/м, а в других – положительной полярности с различной амплитудой (в. Асо, о. Кюсю) [Hatakeyama, 1943, 1949; Nagata et al., 1946; Hatakeyama and Uchikava, 1951].

Во время выпадения пепла от эруптивного облака, возникшего во время извержения вулкана Усу в 1977 г. (о. Хоккайдо, Япония), изменение полярности  $V'$ ЭПА наблюдалось одновременно с изменениями полярности тока проводимости, при этом плотность тока, оценивается примерно в  $J = 10^{-9} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Быстрые изменения полярности в  $V'$ ЭПА указывают на сложное гетерогенное распределение заряда в шлейфах, обогащенных мелкой пирокластикой, а также говорит о наличии относительно небольших, но близко расположенных друг к другу объемных зарядов различной полярности [Kikuchi, 1982].

В результате регистрации  $V'$ ЭПА при Большом трещинном Толбачинском извержении (БТТИ) в июле-октябре 1975 г. (Камчатка) [Руленко, 1979] зарегистрированы возмущения различных полярностей, а также биполярные сигналы  $V'$ ЭПА. Отмечается, что значения  $V'$ ЭПА часто менялось как по величине, так и по знаку, при этом максимальные зарегистрированные значения превышали 30 кВ/м.

В работе [Lane et al., 1992] представлены результаты регистрации  $V'$ ЭПА на вулкане Сакураджима (Япония). Авторы сообщают о биполярных сигналах  $V'$ ЭПА, что указывает на дипольную электростатическую структуру эруптивного облака, причем в большинстве случаев, положительный заряд локализован в его верхней части, а отрицательный заряд в нижней. По данным  $V'$ ЭПА, полученным в период эксплозий средней силы, сделана оценка плотности заряда ( $\rho$ ), определенная в диапазоне  $\rho = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-3}$ , при этом значение электрического заряда ( $Q$ ) в некоторых случаях доходила до  $Q \approx 10 \text{ Кл}$  [Lane et al., 1992].

В Miura et al. (2002) также показаны результаты наблюдений  $V'$ ЭПА на вулкане Сакураджима. Авторами отмечено, что на активной стадии формирования эруптивной колонны продукты извержения преимущественно содержат отрицательно заряженный материал. А когда колонна достигала пика, к верхней и нижней области добавлялись положительные объемные заряды соответственно. Эти результаты свидетельствуют о том, что эруптивные облака обычно состоят из трех областей: верхней с положительно заряженным вулканическим газом и аэрозолем, средней области с отрицательно

заряженными наиболее мелкими частицами пепла и нижней части, положительно заряженных крупных частиц пепла.

По результатам наблюдений  $V'$  ЭПА на вулкане Сакурадзима (Япония) во время его извержения в 1991 [Lane et al., 1992] и 1995 гг. [Miura et al., 2002], а также на Большом трещинном Толбачинском извержении (БТТИ) в июле-октябре 1975 г. (п-ов Камчатка, Россия) [Руленко, 1979] были предложены феноменологические схемы разделения объемных зарядов в эруптивном облаке (рис. 1.4).

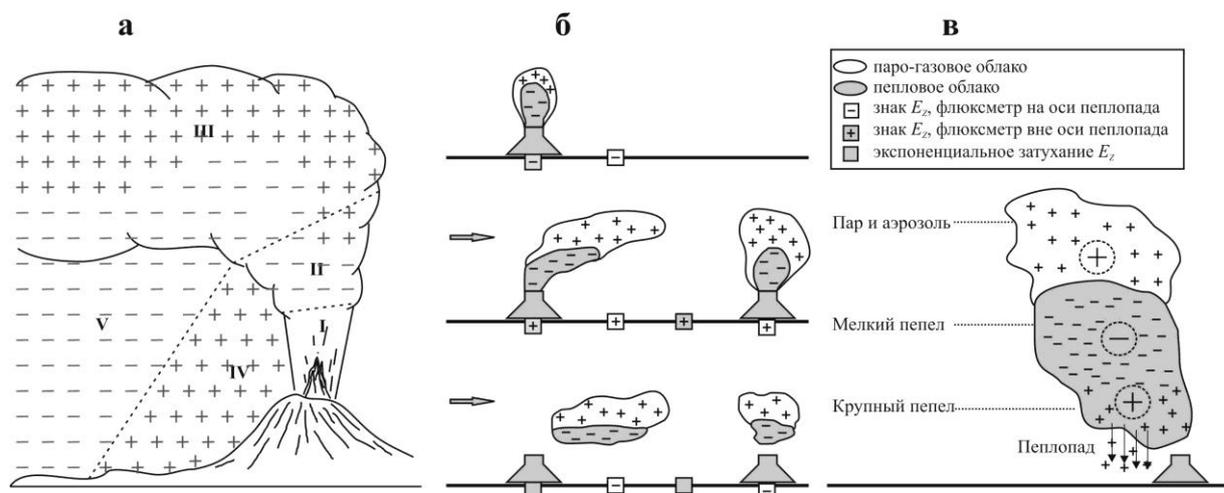


Рисунок 1.4 – Феноменологические схемы разделения заряда: а - в ближней зоне [Руленко, 1979]; б - при формировании вулканического шлейфа под действием ветра, согласно [Lane et al., 1992]; в - разделение зарядов в эруптивных облаках на основе натуральных наблюдений на вулкане Сакурадзима по [Miura et al., 2002]; I – разделение зарядов под действием гравитационных сил на начальном участке при слабом ветре; II – формирование облака на автомодельном участке под действием ветра; III - шлейф в зоне плавучести; IV – область выпадения крупной фракции; V – область выпадения тефры

\*Представленные модели адаптированы автором

В этих работах распределение зарядов в эруптивном облаке объясняется эоловой дифференциацией и седиментацией продуктов извержения в гравитационном поле. По мере удаления эруптивного облака от центра извержения происходит выпадение крупной фракции пепла и образование аэрозолей, что приводит к изменению конфигурации его заряда (см. рис. 1.4). Таким образом, распределение зарядов обусловлено размером пироклаستيки, а также связано с фазовым состоянием эруптивного облака – отрицательный заряд характерен для твердых пепловых частиц, а положительный заряд – для газов и аэрозолей. Приведенные модели формирования объемных униполярных зарядов в эруптивном облаке согласуются с известной феноменологической особенностью трибоэлектризации - биполярного заряжения частиц в зависимости от их размера (size-dependent bipolar charging (SDBC)), при этом отрицательный заряд характерен для мелких частиц, а положительный для более крупных

[Lacks, 2007; Alois et al., 2017; Mendez Harper et. al. 2021]. Такая модель на сегодняшний день является основной и согласуется с наблюдениями [Lane, 1992].

В процессе эволюции эруптивного облака неизбежно изменяется распределение зарядов при его распространении [Van Eaton, 2012]. Влияние ионной и аэрозольной составляющих на распределение электрических зарядов в вулканических шлейфах полностью еще не изучено, но основы термодинамического подхода к этой задаче приведены в работе [Mather, Harrison, 2006].

Гораздо меньше известно об электрификации шлейфов с низким содержанием  $\text{SiO}_2$ , то есть для извержений вулканского, стромболианского и гавайского типов. Некоторые сведения есть для извержений, при которых лавовые потоки спускались в море. В шлейфах таких извержений преобладал пар от разогрева морской воды, а также содержались частицы солей, и небольшие количества мелкодисперсного пепла, возникающего при охлаждении лавы морской водой. Во время извержения базальтового подводного вулкана Сюртсей (Исландия) в 1963 году, по данным наземных наблюдений за  $V'$ ЭПА, плотность положительного заряда составила  $\rho=10^{-7}$  Кл·м<sup>-3</sup> [Anderson et al., 1965]. Аналогичные данные были получены во время извержения на острове Хеймаэй (Исландия) в 1973 году, когда «родился» вулкан Эльдфедль. Были зарегистрированы значения  $V'$ ЭПА до 7 кВ·м<sup>-1</sup> и молниевые разряды [Brook, 1974].

В работе [Nicoll, 2019] сообщается о ранее не замеченном явлении электризации вулканического шлейфа, не нагруженного пеплами. Были проведены измерения вертикального профиля заряда, термодинамических и микрофизических свойств внутри преимущественно газовых шлейфов непосредственно над извергающимся вулканом Стромболи (о. Стромболи, Италия). Проведенные измерения внутри газовых облаков (не нагруженных пеплом) в непосредственной близости от кратера вулкана показали значительную плотность заряда ( $\pm 8$  Кл/м<sup>3</sup>) газового облака. Эти результаты свидетельствуют о том, что процессы зарядки газовых шлейфов могут быть связаны не только из-за их взаимодействия с пеплом. Авторы предполагают, что заряд шлейфа может быть связан с выбросами радона из вулкана, который вызывает ионизацию.

Так как извержения базальтовых вулканов редко сопровождаются сильными взрывами, для них данных наблюдений вариаций  $V'$ ЭПА немного. Базальтовая магма маловязкая, что приводит к тому, что дегазация поднимающейся к дневной поверхности магмы происходит более спокойно и, как правило, без сильных взрывов. Поэтому фрагментацию базальтовой магмы в первом приближении можно рассматривать как процесс струйного жидкого распыления (а не как хрупкое разрушение в отличие от андезитовых и дацитовых магм). Однако в некоторых случаях при извержении базальтовых вулканов могут

возникать мощные эксплозии. Так, если при миграции к поверхности магма вспарывает горизонт подземных вод или встречает воды от оттаянного снежного покрова или ледника, то возникают фреатомагматические извержения. Во время которых возникают эруптивные облака с большим зарядом [Büttner, et al., 2000].

Изучение процессов электризации эруптивного облака в естественных условиях очевидно связано с большими трудностями, в первую очередь, из-за ограниченной возможности точного прогнозирования начала извержений. Поэтому многие научные изыскания в области электризации эруптивных облаков в значительной степени проводились в лабораторных экспериментах и в теоретических работах.

В одной из недавних работ [Mendez Harper et al., 2021] представлены результаты по физическому моделированию кратерных разрядов (стримеров). Моделирование инъекции пепловой струи выполнено с использованием «ударной трубки» [Cimarelli et al., 2014]. В работе авторы впервые экспериментально демонстрируют наличие разделения зарядов зависящего от размера частиц пеплов (SDBC), в гранулированном потоке, при формировании которого наблюдаются разряды в области инъекции (ударной трубки). Показано, что трибоэлектризация является основным механизмом заряжения в области газового напора. Также показано, что после разрядов стримеров на частичках пеплов остается остаточный заряд, которого достаточно для генерации молний на следующем этапе формирования при распространении эруптивного облака.

В работе [Руленко, 1986] были впервые проведены лабораторные исследования контактной электризации (трибоэлектризация) частиц пепла методом их распыления в камере большого объема ( $61 \text{ м}^3$ ), были сделаны следующие выводы:

- возникновение дипольной электрической структуры облаков при распылении вулканического пепла происходит в результате контактного заряжения крупных и мелких частиц электричеством разного знака и пространственного разделения их под действием силы тяжести, причиной такого заряжения является отличие вещественного состава крупных и мелких частиц, т. е. разного содержания в них кристаллов и стекла;
- зависимость интенсивности электризации облаков от массы распыляемого пепла близка к линейной, чем больше масса пепла, тем сильнее электризуются облака;
- с уменьшением медианного диаметра частиц при одной и той же массе пепла интенсивность электризации облаков возрастает.

В работе [Руленко, 1989] показаны результаты исследований электризации вулканического пепла при его распылении с разных по химическому и структурному составу подложек. В работе сделаны следующие выводы:

- причиной униполярного заряжения пепла при распылении его с подложек является, различия как структуры, так и химического состава пепла и подложек, при этом различие структуры вызывает более сильное заряжение частиц, чем различие химического состава;
- при замене подложки изменение среднего заряда на мелких частицах происходит пропорционально площади поверхности частиц, для крупных частиц такая зависимость нарушается, и чем больше их размер, тем больше их различия.

В работе [Aplin, 2014] описывается серия экспериментов по самозаряжению частичек пепла при их падении под действием силы тяжести. В качестве образцов взяты пеплы от извержения в. Гримсвётн (Исландия) в 2011 г. и извержения в. Эйяфьятлайокудль (Исландия) в 2010 г. Показано, что пепел из Гримсвётна обладал большим зарядом, чем пепел из Эйяфьятлайёкюдля. Причины, по которым это происходило, до конца не изучены.

В работе [Климин, 1990] представлены результаты лабораторных исследований электризации вулканического пепла при его взаимодействии с каплями воды. Работы проведены в камере туманов объемом  $61 \text{ м}^3$ . Падение через капельно-жидкий туман пепловых частиц, состоящих из вулканического стекла, сопровождалось столкновением их с каплями, которое заканчивалось их отскоком и передачей отрицательного заряда от более заряженной частицы пепла к менее заряженной капле. Коэффициент передачи заряда составил 1.6, средняя его величина  $40 e$ .

Другим направлением лабораторных исследований стало изучение электризации частиц при их фрагментации. Так в работе [Méndez Harper, 2015] показаны результаты экспериментальных исследований электризации частичек при фрагментации 30 образцов капелек стекла (капли принца Руперта). Было обнаружено, что частицы достигают отношения заряда к массе, аналогичного тем, которые обнаруживаются во время реальных извержений. Также обнаружено то, что заряды, приобретенные частицами при разрушении капель, стимулировали образование агрегатов, агрегация частичек пепла также наблюдается при реальных извержениях.

В работе [Méndez Harper, 2016] представлены результаты экспериментальных исследований трибоэлектризации образцов пепла с разных вулканов. Большое внимание было уделено трибоэлектрическим эффектам, возникающим исключительно в результате столкновения частиц. Показано, что электризация вулканического материала существенно зависит от средней кинетической энергии псевдооживленных гранулированных систем. В частности, показано, что время, необходимое для зарядки образца золы (или другого зернистого материала), уменьшается с увеличением потребляемой энергии. Эксперименты проведены в различных газовых средах, сделано предположение, что стационарный заряд в

гранулированных средах, по-видимому, контролируется в первую очередь характеристиками пробоя обволакивающих атмосфер, а не динамическими процессами в эксплозии.

В теоретической работе [Lacks, 2007] дано объяснение при каких именно физических процессах во время перемешивания (процесс трибоэлектризации) возможна тенденция более мелких частиц заряжаться отрицательно, согласно феноменологической модели SDBC. Это объяснение основано на идее, что столкновения частиц позволяют электронам, захваченным в высокоэнергетических состояниях на одной частице, вырваться в низкоэнергетические состояния на другой частице, и что поверхностная плотность захваченных электронов изначально одинакова на всех частицах.

Важным аспектом формирования объемных электростатических структур в эруптивных облаках является агрегация пепловых частиц и их рекомбинация. Вулканический пепел не оседает в виде отдельных частиц, а в значительной степени зависит от избирательных по размеру процессов седиментации, которые включают агрегацию частиц и гравитационную нестабильность [Durant, 2015; Taddeucci et al., 2011; Brown et al., 2012; Bagheri et al., 2016]. В работе [Dhanorkar, 1997] показано, что распределение заряда частиц меняется из-за процессов агрегации. Кулоновские силы значительно влияют на процессы сталкивания, способствуя агрегации очень мелкой пепловой фракции размером менее 5 мкм с образованием агрегированных пепловых частиц размером более 70 мкм, что убедительно показано в работе [James et. al, 2003]. Pollastri (2021) впервые провел численное моделирование влияния кулоновских сил на процессы агрегации оседающих частиц. Авторы отмечают, что учет таких эффектов значительно улучшит оценку концентрации мелкодисперсной золы в атмосфере.

#### 1.4. Выводы к главе 1

Регистрация  $V'$  ЭПА и анализ полученных данных на различных вулканах мира, а также результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что процесс разделения зарядов в эруптивных облаках во многом связан с феноменологической особенностью разделения зарядов зависящего от размера частиц (SDBC). С другой стороны, многие авторы, которые проводили натурные исследования на действующих вулканах, сообщают о неоднозначности наблюдаемых электростатических структур в эруптивном облаке [Lane et. al., 1992, Miura et al., 2002, Firstov et. al. 2019, 2020, Akbashev et al., 2018, 2019], так для серий извержений на одном вулкане наблюдаются положительные, отрицательные, дипольные структуры и не всегда такое распределение зарядов можно

объяснить моделью на основе SDBC. Поэтому проведение работ на действующих вулканах с использованием современной аппаратуры являются актуальными и в настоящее время. Полуостров Камчатка, Курильские острова (Россия) - это уникальный природный полигон для исследований вулканизма и электризации эруптивных облаков, в частности [Firstov et. al., 2017, 2019, Firstov et. al., 2020, Фирстов и др.2020, 2020, Akbashev et. al., 2018, 2019]. Новые экспериментальные данные, полученные при использовании современной аппаратуры, являются основой для построения физических теорий процессов электризации эруптивного облака.

В диссертации представлены результаты натурных наблюдений  $V'$ ЭПА при распространении эруптивных облаков от извержений вулканов Северной группы (п-ов Камчатка), вулкана Эбеко (о. Парамушир, Россия). Проведены работы по физическому эксперименту формирования пепловых облаков с одновременной регистрацией  $V'$ ЭПА. Выполнено математическое моделирование флуктуаций напряженности электрического поля, обусловленных распространением эруптивного облака.

## **ГЛАВА 2. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ**

### **2.1. Характеристика района исследований и активности вулканов, вблизи которых осуществлялась регистрация V' ЭПА**

Основной целью создания сети пунктов наблюдения V' ЭПА была регистрация откликов от эруптивных облаков. Поэтому пункты для установки электростатических флюксометров выбирались таким образом, чтобы, с одной стороны, они располагались вблизи наиболее активных вулканов полуострова Камчатки, где можно было ожидать распространение эруптивного облака, а с другой стороны, там, где существовали пункты наблюдения за вулканами и/или сейсмологические станции КФ ФИЦ ЕГС РАН [Чебров и др., 2012].

#### **2.1.1. Полуостров Камчатка, район Северной группы вулканов**

По своему геологическому строению район Северной группы вулканов, расположен в Центрально-Камчатской депрессии и сложен плиоценовыми и четвертичными отложениями [Действующие вулканы Камчатки, 1991]. Северная группа включает в себя 17 вулканов, 5 из которых действующие. Самый крупный и наиболее активный из них Ключевской – крупнейший действующий вулкан Евразии. Кроме него к активным вулканам относят Шивелуч, Ушковский, Безымянный и Плоский Толбачик [Федотов и др. 2009].

Северная группа вулканов на полуострове Камчатка является уникальным объектом для изучения механизма извержений, и, в частности, электризации эруптивных облаков (рисунок 2.1). Частые эксплозивные извержения андезитовых вулканов Шивелуч и Безымянный и базальтового вулкана Ключевского, при соответствующих направлениях ветра, повышают вероятность распространения эруптивного облака над поселком Ключи, в котором расположен пункт наблюдения KLY, поселком Козыревск – KZY и поселком Крутоберегово – KBG. В этих пунктах автором были установлены электростатические флюксометры [Shevtsov et al., 2016; Акбашев, Фирстов, 2017; Фирстов и др., 2017].

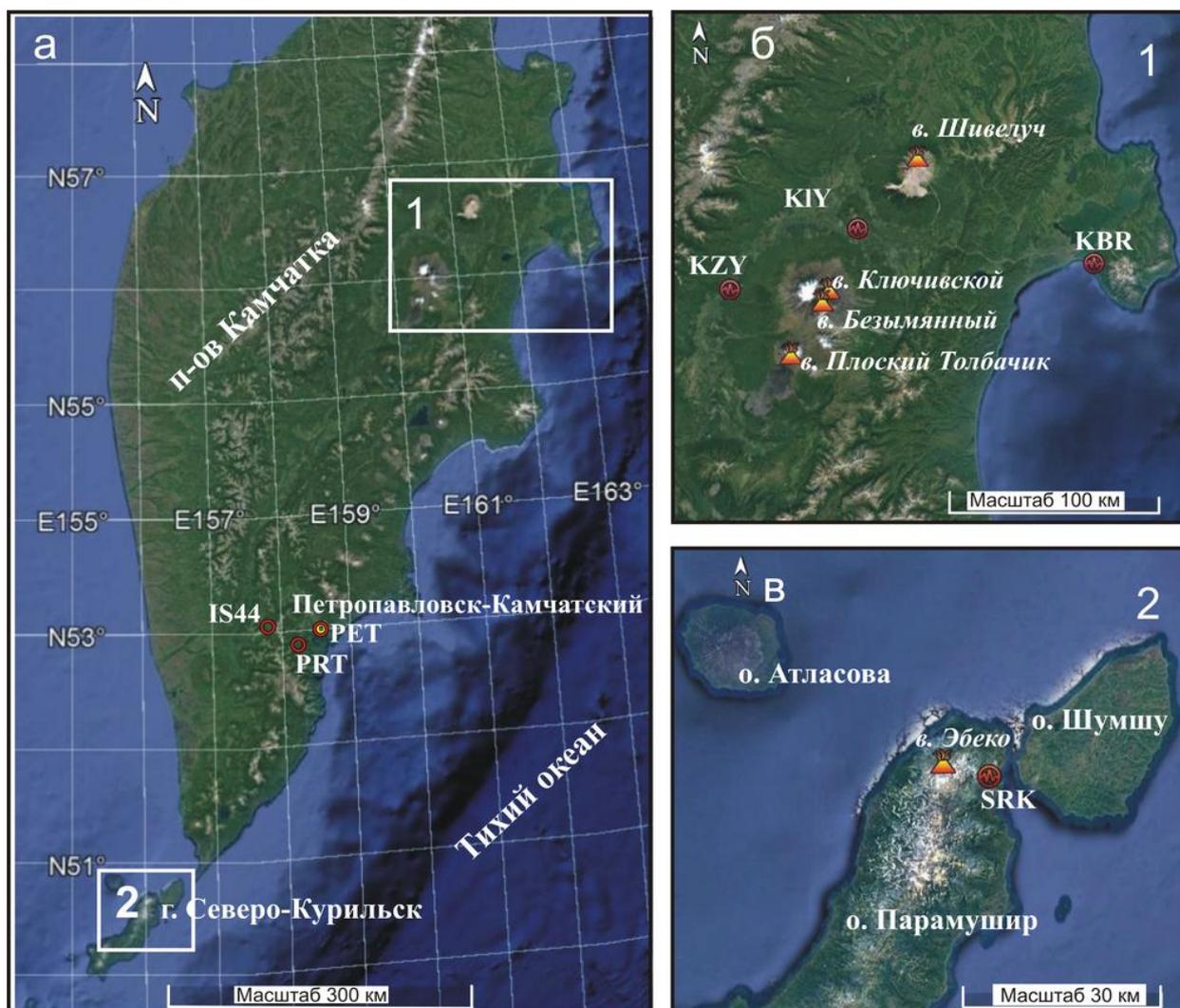


Рисунок 2.1 – Схема расположения пунктов регистрации  $V'$  ЭПА на полуострове Камчатка (верхняя правая панель) и Северных Курилах (нижняя правая панель). KLY расположен в пос. Ключи, KZY – пос. Козыревск, KBR – пос. Крутоберегово, SKR – г. Северо-Курильск, ЗУЕ – г. Петропавловск-Камчатский, IS44 – инфразвуковая станция, PRT – обсерватория ИКИР ДВО РАН

Краткая характеристика активности вулкана Шивелуч. Самый северный действующий на полуострове Камчатка андезитовый вулкан Шивелуч представляет собой сильно разрушенное вулканическое сооружение возрастом ~60-70 тыс. лет, площадь которого составляет не менее 1300 км<sup>2</sup>. Абсолютная высота главной вершины 3283 м. Современная постройка включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч [Действующие вулканы Камчатки, 1991].

Последних 10 тыс. лет для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные извержения типа направленных взрывов и слабые извержения, сопровождающиеся ростом экструзивных куполов. В результате последнего катастрофического извержения 12.11.1964 г. произошло разрушение нескольких

куполов с образованием кратера сложной формы размером  $1.5 \times 3.0$  км и поля отложений «направленного взрыва» объемом  $\sim 1.5$  км<sup>3</sup>. Вслед за этим началась плиннианская деятельность, в результате которой было выброшено  $0.3$  км<sup>3</sup> пепла и извергнуты пирокластические потоки объемом  $0.3-0.5$  км<sup>3</sup> [Горшков, 1969; Белоусов, 1995].

С августа 1980 г. по настоящее время с небольшими перерывами в пределах вновь образованного кратера происходит рост экструзивного купола, который в итоге сопровождается эксплозивным извержением. Регулярные наблюдения за его формированием показали, что скорость роста и расход лавы не постоянны во времени. Выделяются три этапа в формировании экструзивного купола [Жаринов, 2008]. На первом этапе (август 1980 г. – конец 1981 г.) происходило начало формирования экструзии, которое сопровождалось разрушением отдельных его блоков с образованием раскаленных лавин и небольших пирокластических потоков. К концу 1981 г. высота купола составила 135 м. Следующий этап (апрель 1993 – январь 1995 г.) начался с мощного эксплозивного извержения в апреле 1993 г. [Хабуня, 1995; Фирстов, 1994], после которого началась экструзивно-эксплозивная деятельность. При этом наблюдалось выжимание новых экструзий и отдельные эксплозии различной мощности. В некоторых случаях эруптивный столб поднимался до высот тропопаузы (10-12 км н.у.м.), в зависимости от условий ветровой стратификации атмосферы сформированные эруптивные облака распространялись на сотни километров (рисунок 2.2).

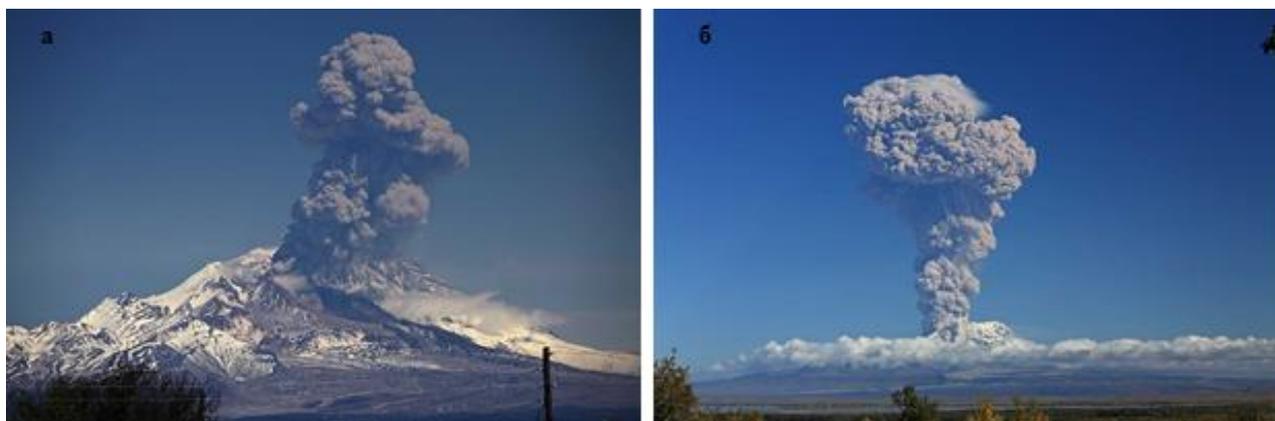


Рисунок 2.2 – Примеры начала формирования эруптивной колонны на вулкане Шивелуч, снятые из пос. Ключи (расстояние от центра кратера  $\sim 45$  км). **а** – 05.06.2011 г., **б** – 29.04.2014 г. (фото А.В. Шевченко)

На третьем этапе к экструзивно-эксплозивной деятельности добавилась эффузивная с выжиманием вязких лавовых потоков. В течение всего рассматриваемого периода осуществлялся мониторинг роста экструзивного купола, что дало возможность оценить объем и расход изверженных пород. В настоящее время экструзивный купол достиг высоты  $\sim 600$  м [Озеров и др., 2000].

Краткая характеристика активности вулкана Безымянный. Вулкан Безымянный (55.98° с.ш., 160.59° в.д) высотой 2869 м, находится в центре Ключевской группы вулканов. Ближайшим соседом Безымянного с севера является потухший вулкан Камень (4670 м), а за ним расположен самый высокий действующий вулкан Европы и Азии — Ключевской (4850 м). Южнее располагается вулкан Плоский Толбачик, для которого характерны мощные латеральные извержения (рисунок 2.1).

Перед катастрофическим извержением 1955–1956 гг. вулкан Безымянный имел высоту 3100 м с кратером диаметром ~0.5 км и считался потухшим. В октябре 1955 г. после ~900-летнего покоя начались эксплозии вулканского типа, а 30 марта 1956 г. на вулкане произошло извержение, уничтожившее вершину и восточный склон. На месте вершины образовался кратер размером 1.5×2.8 км и глубиной 700 м. Вслед за взрывом над кратером поднялась эруптивная колонна на высоту 35–40 км. Область поражения в результате этого пароксизма, выделенная по наличию отложений и повреждений древесной растительности, имела форму овала площадью около 500 км<sup>2</sup> [Горшков, 1965; Белоусов 1998].

В настоящее время 1956 г. вулкан Безымянный проявляет высокую степень активности, связанную с формированием и развитием внутрикратерного купола «Новый» [Girina, 2013]. Можно считать, что вулкан находится в состоянии постоянного длительного экструзивного извержения с выжиманием вязкой лавы с периодами активизации в виде отдельных извержений и периодами относительного покоя. Во время активизации проявление его вулканической активности многообразно: выжимание экструзивных куполов и блоков; эксплозии различной интенсивности, включая направленные взрывы; извержения пирокластических потоков, а в последнее десятилетие выжимание небольших вязких лавовых потоков. Более чем за 50-летний период изучения вулкана Безымянный на нем неоднократно происходили перечисленные выше события [Girina, 2013].

Как правило, извержения вулкана Безымянный проявлялись в виде отдельных эксплозий продолжительностью от 20 минут до трех суток с высотой эруптивного купола от 6 км до 15 км и образованием пирокластических потоков. С 13.04.2000 г. по 01.09.2012 г. средний промежуток времени между извержениями составлял ~240 дней, а затем до декабря 2016 г. в активности вулкана наступила пауза [Сенюков, 2013]. По-видимому, она обусловлена мощным Трещинным Толбачинским извержением имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии (ТТИ-50), происходившим с ноября 2012 г. по сентябрь 2013 г.

### 2.1.2. Остров Парамушир, вулкан Эбеко

Действующий стратовулкан Эбеко по частоте извержений является одним из самых активных вулканов Курильской островной дуги. Вулкан расположен ( $50^{\circ}41'20''$  с. ш.,  $156^{\circ}00'54''$  в. д.) в северной части хребта Вернадского на острове Парамушир в 7 км к западу от г. Северо-Курильска. Вулкан представляет для населения города серьезную опасность (рис. 2.1).

Первые геоморфологические и геологические описания вулкана были опубликованы в [Tanakadate, 1936], [Gorshkov, 1958]. Постройка в. 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.

Все наблюдавшиеся извержения в. Эбеко в 20-21 веках (1934-1935, 1967-1971, 1987-1991, 2009-2011 и 2016-2021 гг.) были чисто взрывными (вулканский тип) и в большинстве случаев происходили из вновь образовавшихся кратеров, открывавшихся на довольно плоской вершине вулкана в пределах северных или средних кратеров (рис. 2.3). Единственным исключением является кратер 1963 года, открывшийся на восточном склоне вулкана. Большинство кратеров были активны менее одного года и производили только один или несколько кратковременных выбросов пепла (взрывы 1963, 1965, 1987-1989 и 2009-2011 годов). В некоторых случаях (в 1967-1971, 1989-1991, 2016-2020 годах и, вероятно, в 1934-1935 годах) взрывная активность новых кратеров продолжалась дольше (более одного года), производя от сотен до тысяч взрывов.

По данным [Меняйлов, 1988] общий вынос газов всеми фумарольными полями вулкана Эбеко в межэруптивные периоды достигает 1900 т/сут. Вынос вулканических газов активным кратером во время извержения 2009 года в среднем составлял 4600 т/сутки. Из эруптивного жерла выбрасывалось в среднем (т/сут):  $\text{H}_2\text{O}$  – 4430,  $\text{CO}_2$  – 128,  $\text{SO}_2$  – 43,  $\text{HCl}$  – 14,  $\text{H}_2\text{S}$  – 8.

По данным [Belousov, 2021] показано, что извержения Эбеко охватывают целый ряд механизмов от чисто магматических до фреатических (гидротермальных) и фреатоматических. Длительность извержений, как правило, составляла 2-4 года, а периоды межэруптивной деятельности — 20-30 лет. Извержения в периоды 1934-1935, 1987 - 1991 и с 2016 – по настоящее время включали свежую магму, в то время как во время других (1967-1971, 2009-2011) свежая магма не извергалась.

19 октября 2016 г. после 5 лет покоя [Котенко, 2018] начался новый цикл активности вулкана Эбеко [Гирина, 2017; Дегтярев, 2020; Котенко, 2018; Рыбин, 2017], который происходил в виде эпизодических эксплозий вулканского типа со значительными вариациями мощности и периодичности [Фирстов и др. 2020]. Этот цикл извержения начался с трех кратеров, которые были активны ранее (в 2009-2011 годах) (рис. 2.3): два из которых находились на дне Среднего кратера и действовали до мая 2017 года, третий на восточном краю активной воронки действовал до августа 2018 года.

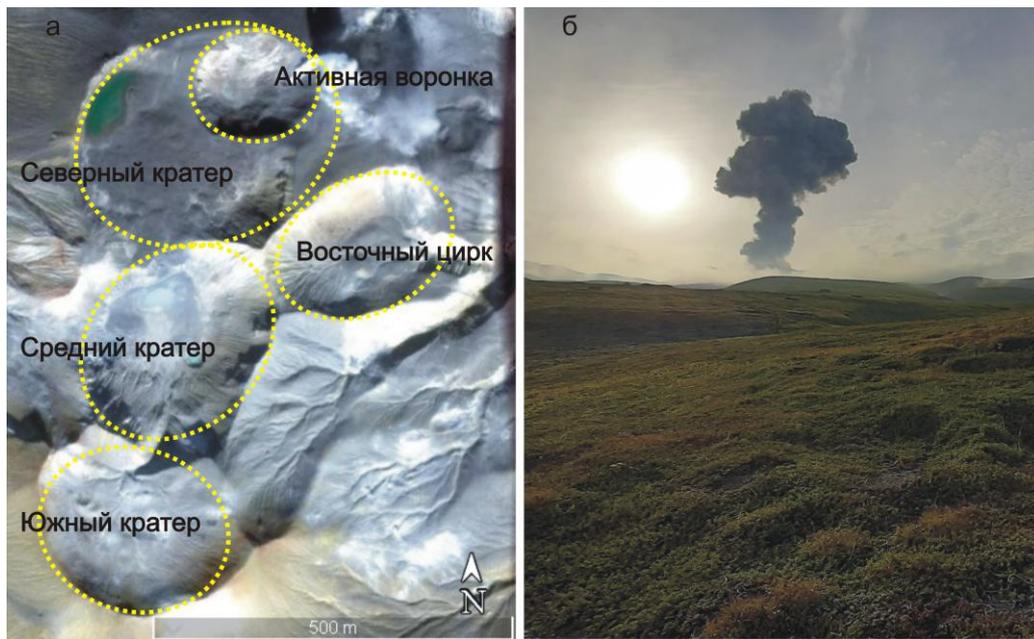


Рисунок 2.3 – а – Схема вершинных кратеров вулкана Эбеко [Рыбин, 2017]; б – пример формирования эруптивного облака в результате извержения Эбеко в 07:11:32 (UTC) 20 августа 2020 г. Фото Р.Р. Акбашев

В апреле 2018 года на западном краю активной воронки появилось новое жерло. В период с апреля 2018 года по август 2018 года внутри активной воронки одновременно действовали два кратера [Walter, 2020]. В последующее время кратер, который сформировался в апреле 2018 года, оставался единственным действующим кратером в активной воронке. В течение последующих лет он постепенно расширялся и был назван Уолтером и др. [Walter, 2020] «Новым Северным кратером». С августа 2018 года вся взрывная активность Эбеко происходит только из Нового Северного кратера (рис. 2.3).

Начиная с июля 2018 года взрывы из Нового Северного кратера стали более мощными с подъемом эруптивной колонны до 5 км н.у.м. [Чибисова, 2019]. 23-24 и 29 сентября 2018 года в Северо-Курильске произошли сильные пеплопады с лапиллями диаметром до 3.5 см.

Над областью кратера наблюдались грохочущие звуки, свечение и молнии [Котенко, 2019]. Диаметр Нового Северного кратера в сентябре 2018 года составлял 100 м [Котенко, 2019]. По состоянию на 15.07.2019 г. новый кратер почти круговой формы имел диаметр в широтном направлении 211 м и глубину ~70 м, высота 1045 м н.у.м [Walter, 2020].

В первые 2 года продолжающегося извержения при взрывах выбрасывался только не ювенильный материал, но с апреля 2019 года сообщается о выбросах бомб с «хлебной корочкой» [Котенко, 2020].

В работах [Котенко, 2018] показано, что гранулометрический, химический, минеральный состав тефры для извержений вулкана Эбеко практически не меняется. При этом тефра представлена в основном резургентным материалом, ювенильные породы присутствовали в незначительном количестве или вообще отсутствовали. По данным [Котенко, 2018] 80% тефры имеет размер частиц менее 0.25 мм, то есть, она представлена в основном вулканическим пеплом. Крупные обломки представлены пористыми андезитами, андезибазальтами. Тонкий пепел – продукты разрушения этих пород. Встречаются обломки вспененного стекла бурого цвета в объеме 1-3% от пробы. Они имеют изометричную форму с острыми сколами. Свежее стекло в пробах не установлено. По химическому и минеральному составу свежесвыпавшая тефра относится к дациандезитам, наиболее кислая разность – к дацитам. Чем дальше от вулкана, тем более кислый состав имеет пепел.

Последнее извержение, начавшееся в октябре 2016 года, продолжается по настоящее время с периодами затишья и активизации.

## 2.2. Регистрация градиента потенциала электрического поля атмосферы

На полуострове Камчатка изучение электрического поля атмосферы началось с 1990 г., когда на обсерватории «Паратунка» (PRT) Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН) был установлен электростатический флюксметр<sup>4</sup> «Поле-2» с системой регистрации полученных данных аналогового типа [Руленко и др., 1992, 1996]. В дальнейшем была создана система сбора, хранения и обработки данных  $V'$ ЭПА в цифровом виде [Бузевич, 1998; Смирнов, 2003]. В настоящее время на обсерватории «Паратунка» кроме «Поле-2» работает современный флюксметр CS110 (Campbell Scientific, Inc., США) [Бабаханов, 2016].

Флюксметр «Поле-2» является прибором обсерваторского типа, но для наблюдений вблизи вулканов был необходим надежный и мало потребляющий энергию флюксметр.

---

<sup>4</sup> В дальнейшем в тексте просто флюксметр.

Этим требованиям вполне соответствовал флюксметр конструкции А.В. Ефимова (ЭФ-4) [Ефимов, 2013] разных модификаций [Патент РФ №110469; Патент РФ № 124400].

Полевые работы на действующем вулкане на Камчатке были впервые выполнены к.ф.-м.н. Руленко О.П. во время БТТИ 1975-1976 г. [Руленко, 1976, 1979].

### 2.2.1. Описание электростатического флюксметра серии «ЭФ- 4»

В настоящее время для регистрации  $V'$  ЭПА в России применяются отечественные флюксметры «Поле 2» и «Градиент», разработанные в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейково [Гордюк, 1981], и флюксметр, разработанный в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН [Анисимов, 1980]. Это надежные приборы, разработанные в 80-х годах, в настоящее время не производятся и уже не отвечают современным требованиям. Одной из причин отсутствия сети пунктов мониторинга электрического поля атмосферы на полуострове Камчатка до 2010 г. являлось отсутствие недорогих, с малым потреблением, отечественных приборов для регистрации  $V'$  ЭПА. Поэтому введение в эксплуатацию недорогих флюксметров типа «ЭФ-4» разработки А.В. Ефимова [Ефимов, 2013] способствовало расширению и развитию наблюдений за электрическим полем атмосферы на полуострове Камчатка.

В основе работы любого динамического электростатического флюксметра лежит процесс прерывания интенсивности измеряемого квазистатического электрического поля, что позволяет за счет явления электростатической индукции генерировать на воспринимающем электроде полезный сигнал. В классическом устройстве процесс прерывания поля осуществляется механическим способом за счет вращения лопастей, напоминающих крылья ветряной мельницы. Поэтому в иностранной литературе употребляется термин - Fields Mill (вертушка). Конструкция механической части модификаций флюксметра «ЭФ- 4», реализующий этот принцип, приведена на рисунке 2.4.

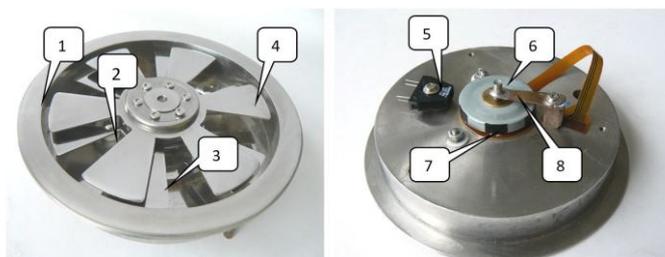


Рисунок 2.4 – Общий вид флюксметра «ЭФ-4»: 1 – чашеобразный корпус; 2 – изолятор; 3 – неподвижный шестилопастной воспринимающий электрод; 4 – шестилопастная

экранирующая пластина (обтюратор); 5 – фотодатчик; 6 – вентиляльный двигатель; 7 – отражающие полосы; 8 – подпружиненный скользящий контакт

Датчик состоит из чашеобразного корпуса 1, в котором на изоляторах 2 закреплен неподвижный шестилопастной воспринимающий электрод 3. Шестилопастная экранирующая пластина (обтюратор) 4 с помощью прижимной шайбы и шести винтов соединена с фланцем, имеющим дроссельную канавку для защиты подшипника двигателя от влаги. Фланец крепится на валу вентиляльного двигателя 6, установленного непосредственно на корпусе. Для обеспечения надежного электрического соединения обтюратора с корпусом, подпружиненный скользящий контакт 8 упирается в торец оси двигателя. На ротор двигателя нанесены 12 чередующихся по отражательным свойствам полос 7. Фотодатчик 5 установленный на корпусе предназначен для считывания информации с ротора двигателя. Корпус, экранирующий и воспринимающий электроды, выполнены из нержавеющей стали и отполированы, а изоляторы изготовлены из фторопласта. Прецизионный вентиляльный двигатель Flat 32 швейцарской фирмы MAXSON с номинальной мощностью 6 ватт с помощью гибкого шлейфа соединяется с платой микропроцессорного управления. Бесконтактные вентиляльные двигатели имеют хорошую динамику и точность позиционирования, обладают большой перегрузочной способностью по моменту силы на валу, отличаются высоким КПД, высокой надежностью и повышенным ресурсом работы. Поэтому для флюксметра этот тип двигателя подходит как нельзя лучше. Его скорость вращения задается и контролируется микропроцессорным блоком. Для «ЭФ-4» она выбрана равной 3600 об/мин и поддерживается с точностью  $\pm 0.17$  об/мин во всем диапазоне действующих нагрузок. Вместе с тем, плоская конструкция вентиляльного двигателя позволяет уменьшить погрешность, вносимую скользящим контактом, выполненного из проводящего фторопласта, так как он упирается в торец оси двигателя, где линейная скорость скольжения минимальная (см. рис. 2.4, поз. 8). При осадках в виде дождя за счет высокой скорости вращения обтюратора капельки воды отбрасываются от воспринимающего электрода, а проникшая в чашку корпуса влага удаляется через три дренажных отверстия. Блок-схема электростатического флюксметра «ЭФ-4» приведена на рисунке 2.5.

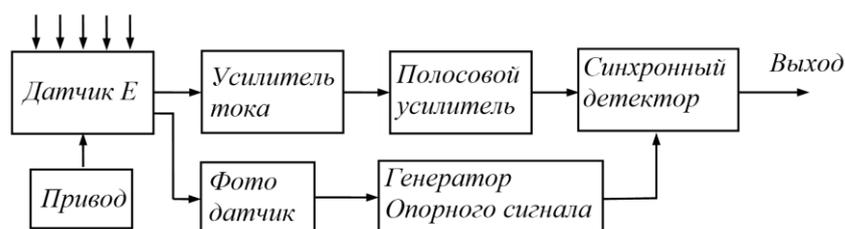


Рисунок 2.5 - Блок-схема электростатического флюксметра «ЭФ-4»

Применение мощного малогабаритного вентиляционного двигателя и поверхностный монтаж рассмотренной принципиальной схемы позволили реализовать устройство в прямоугольном корпусе с габаритными размерами 120×200×45 мм (рисунок 2.6б).

### 2.2.2. Результаты сверки электростатических флюксометров «Поле-2» и «ЭФ-4»

В течение последних 40 лет регистрации  $V''$  ЭПА на обсерваториях России осуществляется с помощью флюксометра «Поле-2», разработанного в ГГО им. А.И. Воейкова в 70<sup>х</sup> годах прошлого века [Гордюк, 1981]. В настоящее время этот прибор мало соответствует современным требованиям как по энергопотреблению и габаритам, так и по элементной базе. Вместе с тем флюксометр «ЭФ-4» [Патент РФ № 110469; Ефимов и др., 2013], разработанный на основе современной микроэлектроники с использованием цифровых технологий, может быть рассмотрен как замена устаревшего «Поле-2». Общий вид флюксометров «Поле-2» и «ЭФ-4» приведен на рисунке 2.6, а в таблице 2.1 их технические характеристики.

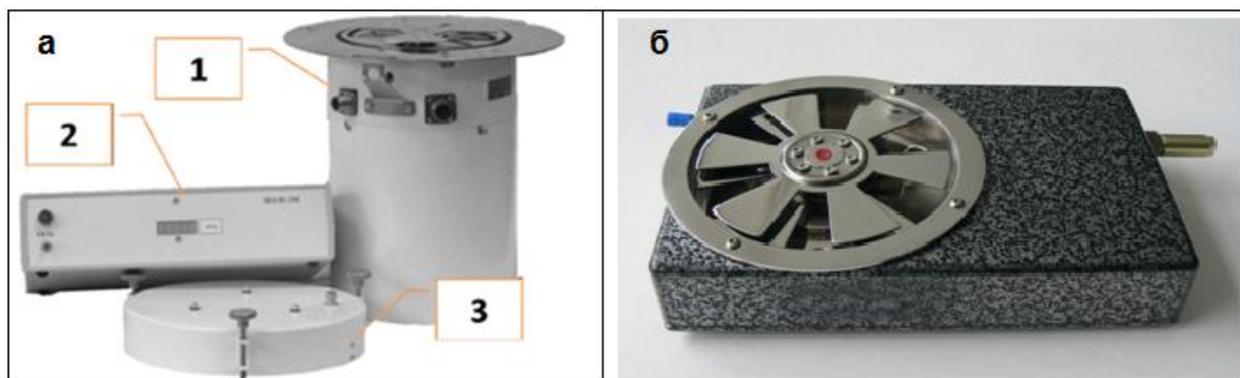


Рисунок 2.6 - Общий вид электростатических флюксометров: а – «Поле-2», б - «ЭФ-4»  
1 – выносной блок первичного преобразователя (датчик), 2 – вторичный блок питания и сопряжения, 3 – насадка на датчик для проведения контроля измерений

Флюксометр первой модификации «ЭФ-4» был установлен на обсерватории «Карымшина» КФ ФИЦ ЕГС РАН в марте 2008 г. За более чем десятилетний период эксплуатации флюксометр зарекомендовал себя как очень надежный прибор. Сильные мокрые снегопады и ливни почти не влияли на режим работы прибора.

Структурные схемы рассматриваемых приборов концептуально одинаковы, но имеются существенные отличия по способу измерения и построению электрической схемы. В «Поле-2» применена двухканальная дифференциальная схема измерений.

Соответственно, имеется два, вложенных друг в друга, воспринимающих электрода, которые экранируются одним заземленным электродом (обтюратором). Казалось бы, что такая система имеет существенно меньшие погрешности измерений, так как синфазные помехи, к которым следует отнести наводки и нестабильности источников питания, имеют одинаковую интенсивность в каналах измерения, и поэтому могут быть подавлены.

Однако основной вклад в погрешность измерений вносит контактная разность потенциалов между экранирующим электродом и «землей», которая в дифференциальной схеме измерений не устраняется. Действительно, при экспозиции одного воспринимающего электрода в измеряемом поле составляющая, обусловленная контактной разностью потенциалов, в соответствующем измерительном канале отсутствует, в то время как на другом воспринимающем электроде она генерируется в полной мере. Дифференциальная схема вычисляет разность сигналов, полученных в двух измерительных каналах, следовательно, на выходе схемы измерения помеха остается. Вместе с тем двойной комплект измерительных электродов позволяет повысить чувствительность прибора. Максимальный теоретический выигрыш в отношении сигнал/шум при этом равен 1.43, но если учесть, что собственные шумы измерительных каналов некоррелированы, то выигрыша может и не быть. При этом конструкция прибора усложняется. Так как между воспринимающими электродами должны быть зазоры, то в них могут возникать водяные (ледяные) перемишки, что приводит при измерениях к дополнительным погрешностям. В флюксметрах классической конструкции, к которой относится «ЭФ-4», такой проблемы нет, но и помеха, обусловленная контактной разностью потенциалов, также не устраняется.

Таблица 2.1 - Технические характеристики электростатических флюксметров «Поле-2» и «ЭФ-4»

| Параметры                                                       | «Поле-2»                                               | «ЭФ- 4»                                        |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Верхняя граница измеряемых напряжений электрического поля, кВ/м | 1 канал $\pm 0.5 \pm 40\%$<br>2 канал $\pm 5 \pm 40\%$ | $\pm 2$ или $\pm 4$                            |
| Максимальное выходное постоянное напряжение датчика, В          | $\pm 1$                                                | $\pm 5$                                        |
| Выходное сопротивление, Ом                                      | 75                                                     | 2000                                           |
| Среднеквадратическая погрешность измерения                      | 0.5%                                                   | 5 мВ                                           |
| Время выхода в номинальный режим, мин                           | 20                                                     | 30                                             |
| Напряжение питания, В                                           | 220                                                    | 10-14                                          |
| Потребляемая мощность, Вт                                       | 30                                                     | 3                                              |
| Температура воздуха                                             | $-50^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$         | $-40^{\circ}\text{C}$ до $+80^{\circ}\text{C}$ |
| Влажность                                                       | до 100%                                                |                                                |
| Режим работы                                                    | непрерывный                                            |                                                |
| Вес, кг                                                         | 3                                                      | 1                                              |

В электростатических флюксметрах на точность измерений влияет нестабильность скорости вращения обтюлятора. В «Поле-2» используется мощный двигатель переменного тока, число оборотов которого поддерживается на заданном уровне путем стабилизации напряжения питания. Однако этого недостаточно, так как механическая нагрузка на обтюратор (а, следовательно, и его число оборотов) меняются во времени. Высокое энергопотребление мощного двигателя требует сети переменного тока, а его непрерывная эксплуатация является причиной частых регламентных работ. В отличие от «Поле-2», в «ЭФ-4» используется прецизионный вентильный двигатель с напряжением питания +12 В, который потребляет в рабочем режиме не более 0.3А. Его скорость вращения поддерживается на заданном уровне микропроцессорной системой, которая учитывает нагрузку на двигатель. При этом в качестве источника питания можно использовать аккумулятор, что позволяет работать прибору в автономном режиме в отсутствии сетевых помех.

Что касается различий в реализации электрических схем, то можно указать на разные схемы синхронных детекторов. В «Поле-2» это ключевая схема, требующая тщательной индивидуальной настройки, а в «ЭФ-4» применяется прецизионный (с лазерной подгонкой) перемножитель аналоговых сигналов с гарантированной точностью выполнения операции. Так как от точности работы синхронного детектора напрямую зависят погрешности измерений, это различие в схемах перемножителей является существенным фактором. В «Поле-2» синхронизация сигналов осуществляется регулируемым фазовращателем, однако это обстоятельство не является существенным преимуществом. Важна не точная синхронизация, а стабильность разности фаз между сигналами, подаваемыми на синхронный детектор. При нестабильной скорости вращения обтюлятора фазовращатель вносит фазовую ошибку. В «ЭФ-4» подстройка разности фаз задается механическим путем и не зависит от скорости вращения двигателя.

Обработка информационного сигнала как в «Поле-2», так и в «ЭФ-4» осуществляется в аналоговом виде на основе операционных усилителей, для которых имеет место пороговый эффект, проявляющийся в зависимости фазового набега от уровня сигнала и который следует учитывать при калибровке. В «ЭФ-4» он сведен к минимуму. Пороговый эффект приводит к тому, что при измерении больших значений напряженности поля калибровочная характеристика приборов становится нелинейной. Поэтому рассматриваемые приборы нуждаются в тщательной калибровке в верхней части диапазона измерений, что в известной мере является проблемой.

Выявленные различия в построении приборов позволяют сделать вывод, что метрологические характеристики «ЭФ-4» не уступают характеристикам «Поле-2», при

меньших габаритах, весе, и энергопотреблении, высокой надежности и стабильной погрешности измерений (см. таблицу 2.1).

Проверка на идентичность «ЭФ-4» проводилась диссертантом на обсерватории «Паратунка» (PRT) (рис. 2.1) [Акбашев и др., 2015], где флюксметр «Поле-2» установлен на площадке радиусом 12 м, расчищенной от деревьев, на эквипотенциальной поверхности высотой 3 м (рисунок 2.7а), выравнивающей силовые линии электрического поля параллельно поверхности Земли (рисунок 2.7б). Выходной сигнал прибора оцифровывался с частотой 1 Гц 14-битным АЦП и записывался на жесткий диск персонального компьютера.

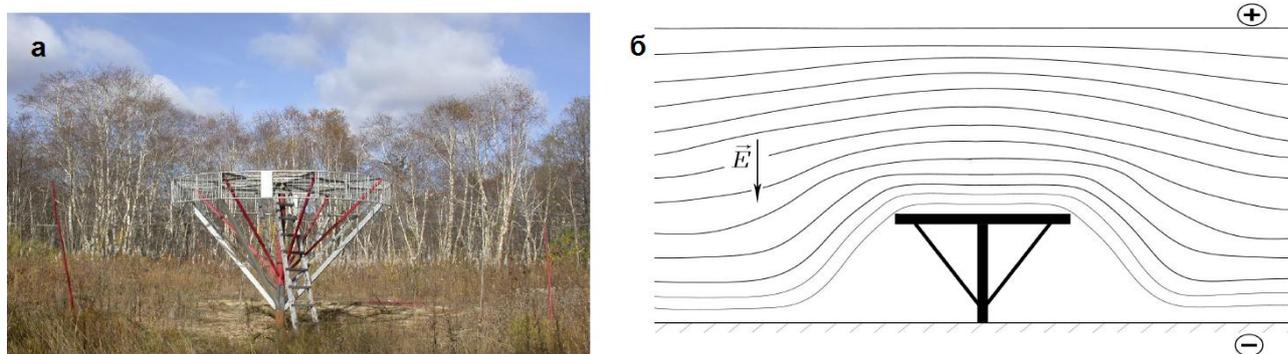


Рисунок 2.7 – а – Общий вид эквипотенциальной поверхности, где установлен флюксметр «Поле-2» на обсерватории ПРТ, б – схема линий напряженности ЭПА над эквипотенциальной поверхностью

Для проверки идентичности работы флюксметр «ЭФ-4» устанавливался на той же площадке, и их совместная работа продолжалась с 21.12.2014 г. по 15.01.2015 г. Суточные графики записей вариаций  $V'$  ЭПА, без учёта коэффициентов с целью вычисления истинных значений, в условиях «хорошей погоды» и в условиях низкой облачности приведены на рисунке 2.8. Наблюдается очень хорошее сходство сигналов с обоих флюксметров. Вариация относительной ошибки значений «ЭФ-4» к «Поле-2», рассчитанной по формуле

$$\delta\% = \left( \frac{U_{\text{Э}} - U_{\text{П}}}{U_{\text{П}}} \right) \cdot 100, \text{ за рассматриваемый период не превосходит } \delta > 7.6\% \text{ (рисунок 2.8а, б).}$$

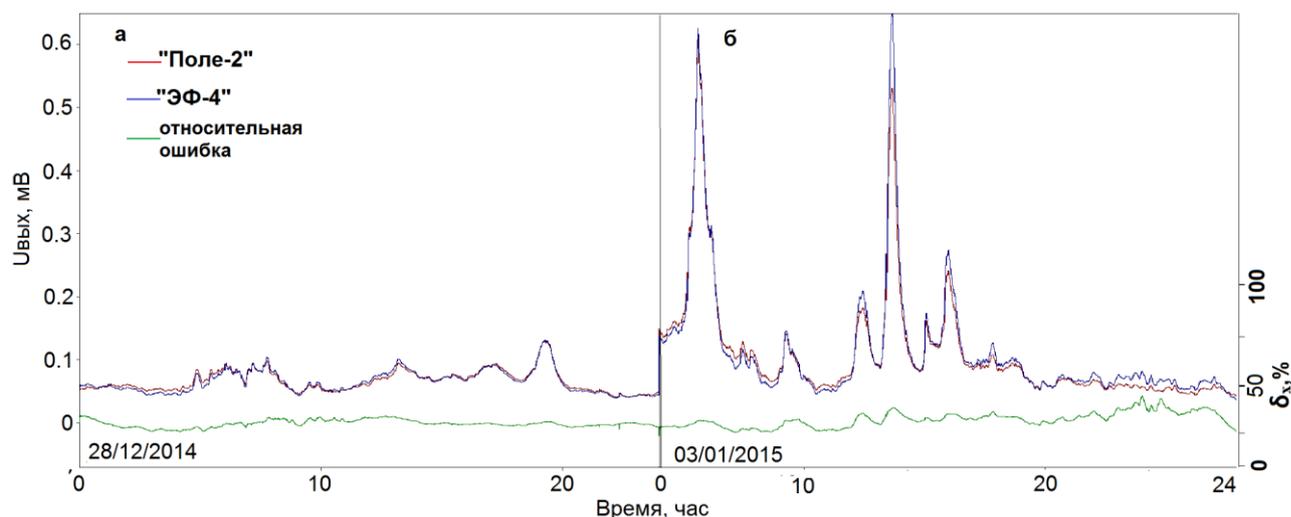


Рисунок 2.8 - Суточные вариации, записанные электростатическими флюксметрами «Поле-2» и «ЭФ-4»: а – 28.12.2014 г., б – 03.01.2015 г.

Для получения абсолютных значений  $V'$  ЭПА, необходимо знать зависимость  $V'=f(U)$ , которая оценивается при калибровке приборов. В комплекте флюксметра «Поле-2» предусмотрена специальная калибровочная насадка (рисунок 2.6а), с помощью которой был прокалиброван чувствительный канал испытуемого прибора (рисунок 2.9а).

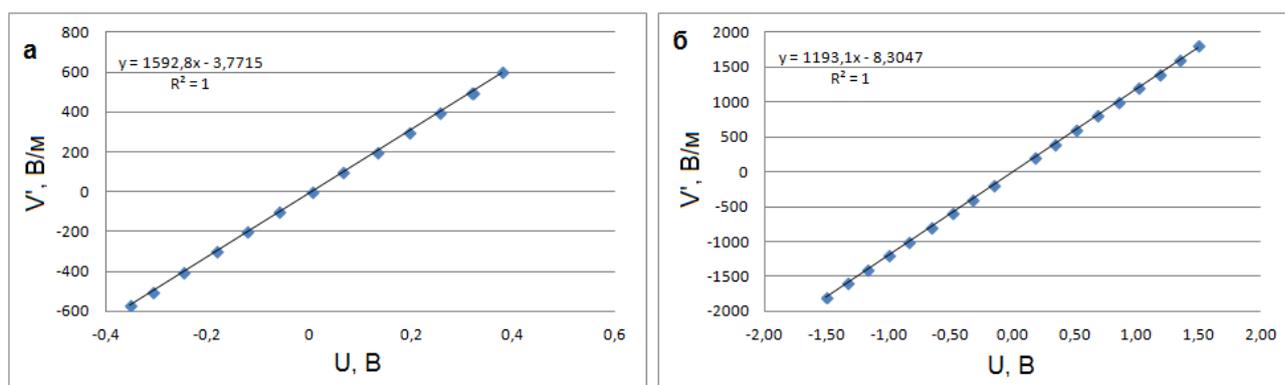


Рисунок 2.9 - Калибровочная функция: а – для флюксметра «Поле-2»; б - для «ЭФ-4»

Для калибровки «ЭФ-4» автором был изготовлен калибровочный стенд размером 70×70 см, представляющий из себя плоский конденсатор с обкладками из фольгированного текстолита. Флюксметр «ЭФ-4» размещался в стенде так, чтобы его обтюратор находился в плоскости нижней пластины конденсатора по её центру. Нижняя обкладка вместе с прибором заземлялись, а между пластинами подавалось напряжение от источника постоянного тока. При известных геометрических параметрах конденсатора рассчитывалась напряженность электрического поля в конденсаторе и строилась калибровочная зависимость  $V' = f(U_{\text{вых}})$  для «ЭФ-4» (рисунок 2.9б). Как видно из рисунка, для калибровочных зависимостей коэффициент детерминации  $R^2$  равна единице (рисунок 2.9), что характеризует 100% линейность и стабильность динамического диапазона приборов.

Пересчитанные кривые в абсолютные значения  $V'$  ЭПА для обоих флюксометров за периоды 28.12.2014 г. – 31.12.2014 г. и 02.01.2015 г. – 05.01.2015 г. показаны на рисунках 2.10а, б, из которых следует, что динамика вариаций  $V'$  ЭПА в показаниях обоих приборов достаточно близка, но абсолютные значения имеют относительные отклонения до 20%. По-видимому, это связано с различием мест установки приборов.

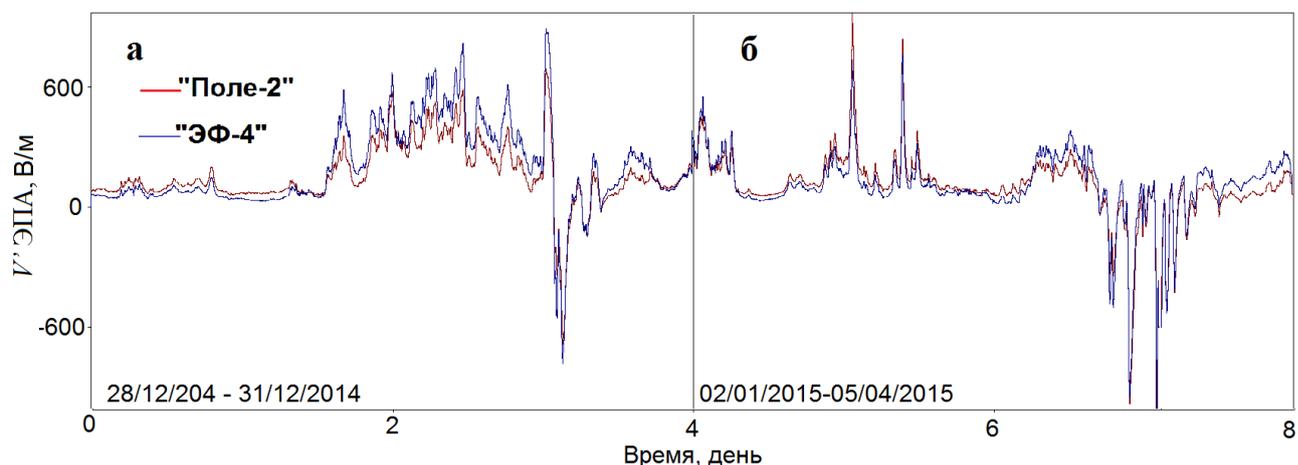


Рисунок 2.10 – Два четырехсуточных фрагмента записей  $V'$  ЭПА флюксометрами «Поле- 2» и «ЭФ-4»: а – 28.12.2014 г.-31.12.2014 г., б – 02.01.2015 г.-05.01.2015 г.

«Поле-2» был установлен в центре эквипотенциальной площадки (см. рисунок 2.7а), тогда как «ЭФ-4» – ближе к краю этой площадки. Эквипотенциальная поверхность создает локальное сжатие силовых линий электрического поля атмосферы, поэтому даже незначительное возвышение обтюлятора над ней вызывает изменения в показаниях прибора. В этом плане установка сравниваемых приборов была различна: обтюратор «Поле-2» был установлен заподлицо с эквипотенциальной поверхностью, в то время как «ЭФ- 4» возвышался над ней на величину своей высоты.

### 2.2.3. Сеть пунктов мониторинга $V'$ ЭПА на Камчатке и о. Парамушир

Как правило, геодинамические процессы, к которым можно отнести землетрясения и вулканические извержения, сопровождаются взаимодействием геосферных оболочек. Такие взаимодействия проявляются возмущением в геофизических полях различной природы, в том числе в электрическом поле атмосферы [Firstov, 2020; Фирстов, 2019; Акбашев, 2015, 2018; Akbashev, 2018; Чернева, 2018,2013]. Мониторинг  $V'$  ЭПА позволяет регистрировать такие возмущения. Для этих целей на п-ове Камчатка и о. Парамушир вблизи действующих вулканов диссертантом создана сеть пунктов регистрации  $V'$  ЭПА.

На полуострове Камчатка Северная группа вулканов является уникальным объектом для изучения электризации эруптивных облаков. Эксплозивные извержения андезитовых вулканов Шивелуч и Безымянный, сопровождаются значительным выносом вулканического материала, формируются эруптивные облака, высота подъема которых может достигать высот тропопаузы (12-13 км н.у.м. для п-ва Камчатка), в п. Ключи, п. Козыревск, п. Крутоберегово выпадает пепел.

В поселках Ключи, Козыревск, Крутоберегово находятся научно-исследовательские обсерватории Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) – станции сейсмологического мониторинга (с/с). На базе данной научно-исследовательской инфраструктуры автором в инициативном порядке были организованы пункты регистрации  $V'$ ЭПА. Географическое расположение пунктов регистрации  $V'$ ЭПА и расположение Северной группы вулканов наилучшим образом подходит для возможности зарегистрировать возмущения  $V'$ ЭПА от эруптивных облаков (рис. 2.1).

Вулкан Эбеко является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги. Вулкан находится в 7.2 км от г. Северо-Курильск. В городе находится сейсмостанция Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Частые эксплозии вулкана Эбеко в совокупности с логистической доступностью и доступность, с точки зрения постройки вулкана для проведения натуральных экспериментов, делают вулкан Эбеко удобным объектом исследований – природной лабораторией для изучения электризации эруптивных облаков. Поэтому на базе сейсмостанции СФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Северо-Курильск диссертантом был установлен комплекс аппаратуры, для регистрации  $V'$ ЭПА и инфразвуковых волн, которые сопровождают эксплозии вулкана.

В период с 27.07.2020 г. по 05.08.2020 г. на вулкане Эбеко был проведен натуральный эксперимент. На склоне вулкана были установлены два временных пункта наблюдения  $V'$ ЭПА (подробное описание эксперимента дано в главе 3) (рис. 3.1).

Таким образом, пункты непрерывной регистрации  $V'$ ЭПА организованы на сейсмостанциях КФ ФИЦ ЕГС РАН и СФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 2.1, рис. 2.11). Координаты пунктов регистрации и особенности установки датчиков приведены в таблице 2.2.



Рисунок 2.11 – Пункты наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы на п-ве Камчатка и о. Парамушир.

Таблица 2.2. Координаты и сроки работы пунктов наблюдения  $V'$  ЭПА

| Код пункта регистрации | Широта, гр. N | Долгота, гр. E | Сроки работы        | Примечание                                                                               |
|------------------------|---------------|----------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| KZY                    | 56.0573       | 159.8726       | С 5.12.2013         | Датчик установлен на мачте на высоте 4.5 м от поверхности земли.                         |
| KLY                    | 56.3183       | 160.8559       | С 1.08.2016 по н/в  | Датчик установлен на крыше здания с/с на высоте 6 м от поверхности земли.                |
| KBG                    | 56.2587       | 162.7114       | С 12.12.2018 по н/в | Датчик установлен на высоте 3.5 м от поверхности земли.                                  |
| PEТ                    | 53.0233       | 158.6499       | С 5.04.2020 по н/в  | Датчик установлен на высоте 4 м от поверхности земли.                                    |
| SKR                    | 50.6702       | 156.1158       | С 1.10.2018 по н/в  | Работают два датчика, установленные на мачте на высоте 5 м и 9.5 м от поверхности земли. |

Два раза в год проводится регламентное обслуживание аппаратуры. Исправность флюксметров подтверждается параллельной работой контрольного датчика. Для учета влияния высоты расположения датчика на абсолютные значения  $V'$  ЭПА вычисляется коэффициент редукции. Для этого контрольный датчик устанавливается на поверхности земли. Коэффициент редукции определяется отношением показаний контрольного датчика на уровне земли к показаниям датчика, установленного в пункте регистрации.

### 2.2.4. Программно-аппаратурный комплекс для сбора и хранения данных

С целью получения данных в режиме, близком к реальному времени, и осуществления возможности управления параметрами регистрации аналоговых сигналов с датчиков, установленных на пунктах регистрации, был разработан и внедрен программно-аппаратурный комплекс. На рис. 2.12 приведена его принципиальная блок-схема.

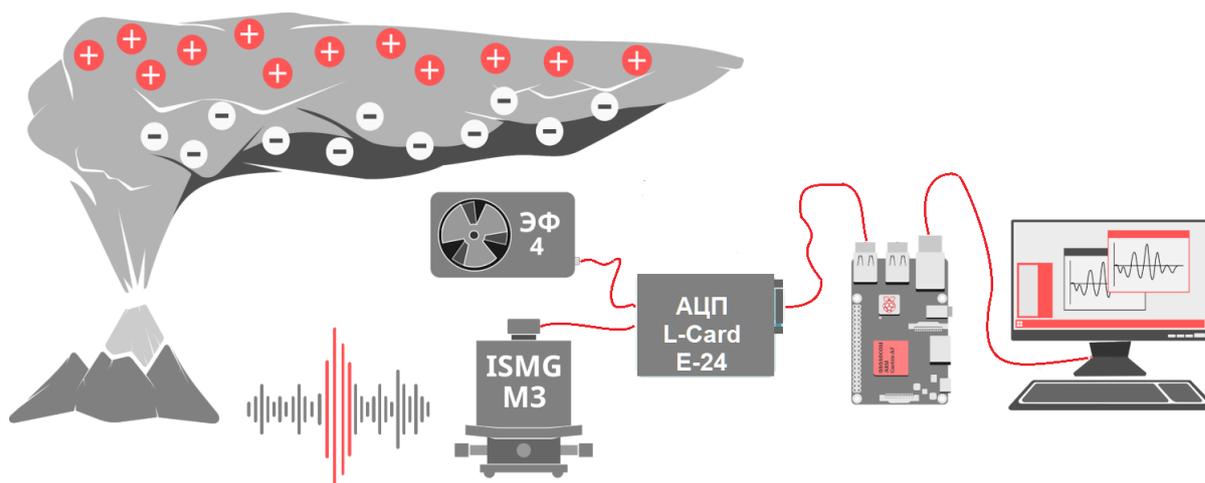


Рисунок. 2.12 – Блок-схема программно-аппаратного комплекса: 1 – датчики (флюксометр, микробарограф), 2 – аналого-цифровой преобразователь (L-card E24), 3 – микрокомпьютер (Thiner Board фирмы Asus/ RaspberryPi 2), 4 – персональный компьютер

Аналоговые сигналы с датчиков «ЭФ-4» через АЦП E-24 поступают на SD носитель микрокомпьютера Thiner Board фирмы Asus или RaspberryPi и записываются с часовым интервалом в отдельный файл. АЦП L-Card E24 имеет 4 гальванически «развязанных» входных аналоговых разъема. Это позволяет вести регистрацию с 4 аналоговых приборов. Технические характеристики АЦП и микрокомпьютера приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Технические характеристики АЦП L-Card E24, микрокомпьютера RaspberryPi 2

|                                                                                                                                          |        |                                                                                                                                               |                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|  <p style="text-align: center;"><b>L-Card E24</b></p> |        |  <p style="text-align: center;"><b>RaspberryPi 2</b></p> |                  |
| Диапазон измеряемой напряженности поля                                                                                                   | 2 кВ/м | Модель процессора                                                                                                                             | ARM Cortex-A7    |
| Верхняя граничная частота                                                                                                                | 5 Гц   | Количество ядер процессора                                                                                                                    | 4                |
| Выходное сопротивление                                                                                                                   | 2 кОм  | Частота процессора                                                                                                                            | 900 МГц          |
| Выходное напряжение                                                                                                                      | 5 В    | Размер оперативной памяти                                                                                                                     | 1 Гб             |
| Среднеквадратичная погрешность измерений                                                                                                 | 5 мВ   | Вид доступа в Интернет                                                                                                                        | Ethernet (RJ-45) |

|                                       |             |                                    |                    |
|---------------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|
| Напряжение питания (постоянного тока) | 10–14 В     | Скорость сетевого адаптера         | 100 Мбит           |
| Температура эксплуатации              | –40 - +80 С | Установленная операционная система | DietPi             |
| Режим работы                          | Непрерывный | Необходимое питание                | 5 В, 1 А, microUSB |

Микрокомпьютер позволяет удаленно в автоматическом режиме производить настройку и сохранение данных с датчиков, а операционная система DietPi, установленная на микрокомпьютере, позволяет сократить количество потребляемых ресурсов. Данные с часовой периодичностью формируются на микрокомпьютере, собираются в суточный архив, и затем отправляются на сервер в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Программная часть комплекса реализована на языке программирования Python. Для работы с L-Card E24 использовалась библиотека PyE24 ([https://bitbucket.org/john\\_16/pye24lib](https://bitbucket.org/john_16/pye24lib)).

На сервере реализована первичная обработка исходных данных, которая выполняется в автоматизированном режиме по средствам программы-конвертора «SynCover». Программа позволяет выполнить следующие действия: арифметические операции для получения абсолютных значений  $I'$  ЭПА, в соответствии с заданными коэффициентами для соответствующего флюксметра и коэффициента редукации; сформировать суточный файл данных (в формате времени UTC), конвертировать исходный файл в формат «.asc»; сохранить конечный файл в соответствующей директории на сервере. Полученный файл является конечным и используется в дальнейшем для интерпретации, и анализа. Блок-схема данной программы представлена на рис. 2.13.

Аппаратно-программный комплекс разработан диссертантом, м.н.с. Будиловым Д.И. и инженером-исследователем Загодевкиным И.А.

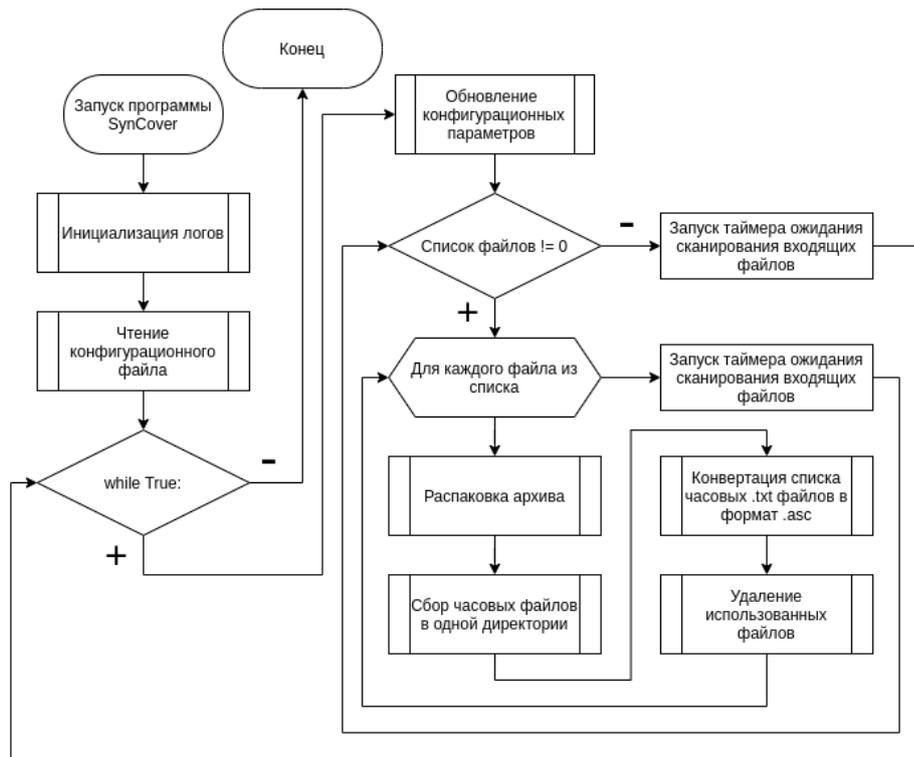


Рисунок - 2.13 – Блок-схема программы-конвертора SynCover

Анализ зарегистрированных временных данных произведен в программном комплексе Dimas [Дроздин, 2010].

### 2.3. Методы идентификации возникновения и распространения эруптивных облаков, от эксплозивных извержений вулканов Камчатки и в. Эбеко о. Парамушир

Возникающая эруптивная колонна при эксплозивных извержениях вулканов достигает высоты более 10 км. Под действием условий ветровой стратификации атмосферы формируются эруптивные облака, которые могут распространяться на сотни километров и представлять серьезную угрозу для авиатранспорта. В связи с расширением объема и географии авиаперевозок в последние годы резко повысилась вероятность пересечения авиалайнеров с траекторией распространения эруптивного облака от извержений. Большое количество авиатрасс, соединяющих Аляску и западное побережье США с Восточно-Азиатским регионом, пролегает вдоль восточного побережья Камчатки и Курильских островов. Поэтому одной из задач КФ ФИЦ ЕГС РАН является мониторинг эксплозивной активности вулканов Камчатки.

Современное состояние технических средств и их возможности позволили создать систему комплексного мониторинга вулканов, позволяющую на основе цифровой

регистрации параметров геофизических полей осуществлять мониторинг процесса подготовки и характер извержений [Чебров и др., 2012; Сеньюков, 2013]. В неё входят следующие элементы:

- специализированные пункты наблюдений за вулканической деятельностью, оснащенные техническими и программными средствами каналов связи для передачи данных наблюдений в реальном масштабе времени;
- региональные сейсмические станции;
- информационно-обрабатывающие центры данных комплексных наблюдений с коммуникационной системой сбора информации в реальном масштабе времени;
- спутниковые технологии мониторинга вулканов (систем спутникового позиционирования, космических радаров с синтезированной апертурой – SAR, различных радиометров – AVHRR, ASTER, MODIS).

Электрическое поле атмосферы является высокочувствительным индикатором множества локальных природных и антропогенных процессов [Козлов, 2018, 2019; Аджиев, 2019; Торопов, 2017, Чернева, 2018]. Наибольший вклад в состояние локального электрического поля атмосферы вносит метеорологическая обстановка [Пустовалов, 2016, 2016]. Динамика возмущений в вариациях  $V'$ ЭПА, связанных с метеорологической обстановкой во многом схоже с динамикой откликов  $V'$ ЭПА приуроченных к распространением эруптивных облаков [Нагорский, 2021]. Поэтому важной задачей исследований является точная идентификация откликов  $V'$ ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков.

В диссертации с целью идентификации моментов возникновения эксплозивных извержений и развития эруптивных облаков использовались данные, полученные системой комплексного мониторинга вулканов.

### **2.3.1. Регистрация эксплозивных землетрясений и волновых возмущений, возникающих во время эксплозий**

Надежными дистанционными методами детектирования эксплозивной активности вулканов являются сейсмический и инфразвуковой мониторинг. Если первый дает информацию об интенсивности и продолжительности эксплозивного процесса, то второй указывает на степень его нестационарности и интенсивности выноса пепла в атмосферу.

Сейсмический мониторинг эксплозивной активности вулканов на п-ве Камчатка обеспечивается сетью радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС), установленных

вблизи действующих вулканов. РТСС Камчатки включает в себя три куста станций: Петропавловский (18 станций), Козыревский (9 станций), Ключевской (9 станций). Деление на кусты обусловлено расположением приемных центров, на которых ведется регистрация сейсмометрической информации соответствующих станций (рис. 2.14). Информация с радиотелеметрических сейсмических станций собирается на 3-х приемных центрах РТСС, расположенных в г. Петропавловск-Камчатский, пос. Ключи и пос. Козыревск, в реальном масштабе времени. Приемные центры РТСС соединены выделенными спутниковыми каналами, что позволяет иметь доступ ко всем станциям РТСС на каждом рабочем месте. На Петропавловском приемном центре непрерывные данные всех станций РТСС сохраняются на архивном сервере и записываются на дисках CD-R и DVD, которые далее передаются в архив КФ ГС РАН.

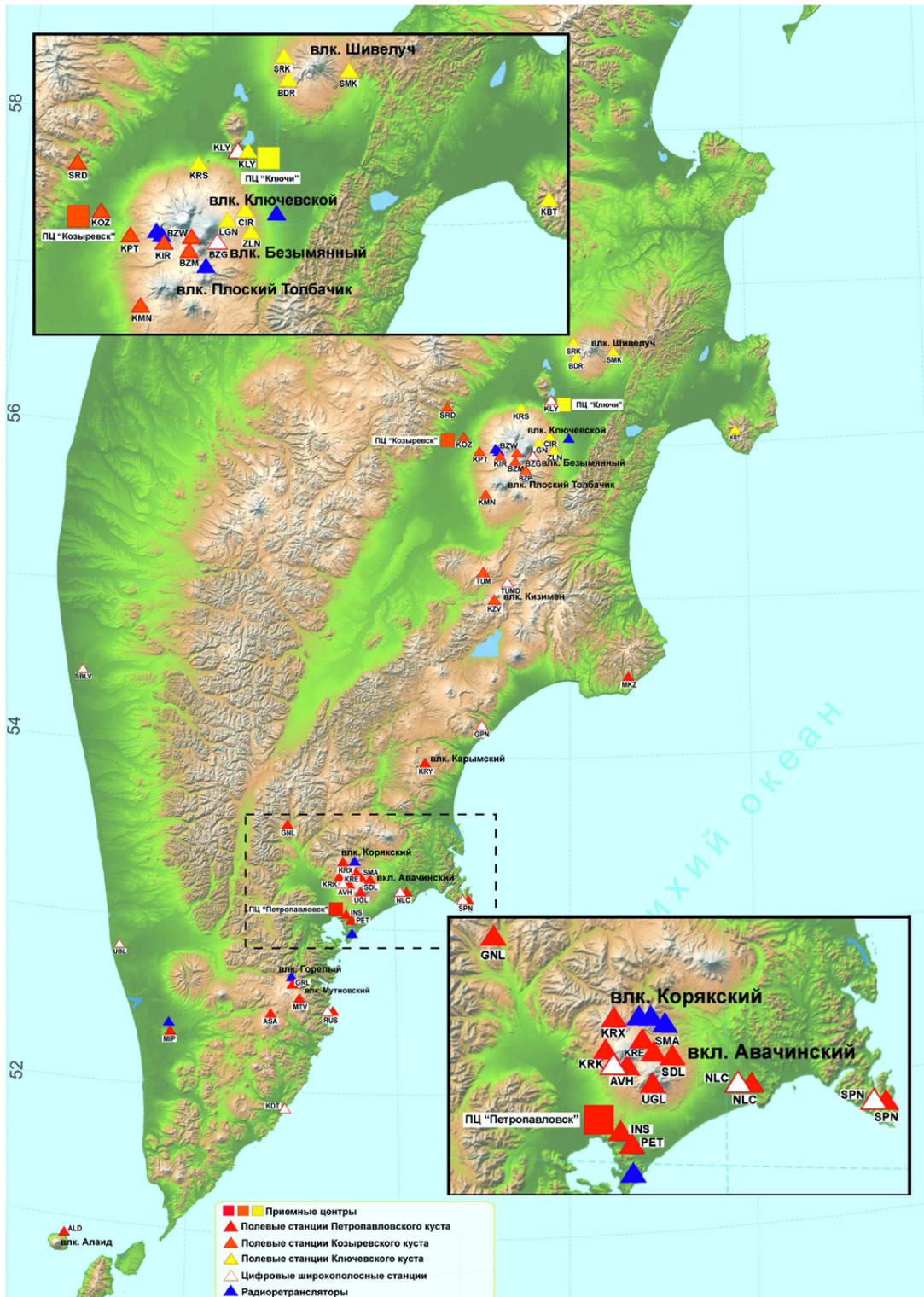


Рисунок 2.14 – сеть радиотелеметрических сейсмических станций

С целью исследования волновых возмущений в атмосфере, сопровождающих вулканические извержения, на п-ове Камчатка действует несколько пунктов КФ ФИЦ ЕГС РАН, которые оснащены каналами регистрации инфразвуковых станций (ИС) – KLY, KZV,

PRT а также в IS44 (рис. 2.1), что позволяет вести мониторинг сильных эксплозивных вулканических извержений [Гордеев, 2013; Фирстов, 2012, 2020].

В качестве датчиков для инфразвуковых каналов в пунктах PRT и KZV используется дифференциальный микробарограф ISGM-03M (Россия) с рабочим диапазоном частот 0.002–4.0 Гц. Технические характеристики микробарографа ISGM-03M представлены в таблице 2.3. Кроме того, в пункте Начики работает акустическая станция IS44 IMS (рис. 2.1), на которой установлена антенная решетка из 4 микробарографов M-2000 (Франция) с апертурой ~1.8 км, позволяющая вести регистрацию ИС в диапазоне частот 0.003–5 Гц и определять азимут на источник.

Дополнительно к действующей сети регистрации волновых возмущений в атмосфере, для более уверенной регистрации сигналов от относительно не сильных извержений вулкана Эбеко на SKR в 2018 г. диссертантом был установлен микробарограф ISGM- 3M, технические характеристики датчика представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Технические характеристики микробарограф ISGM- 3M

|                                                                                                       |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <br><b>ISMG-3M</b> |                   |
| Рабочий диапазон частот                                                                               | 0.02 – 4.0 Гц     |
| Режим работы                                                                                          | Непрерывный       |
| Максимальная амплитуда $\Delta P$                                                                     | не менее 100 Па   |
| Чувствительность                                                                                      | 80 мВ/Па          |
| Напряжение питания                                                                                    | 12+10% В          |
| Среднее квадратическое значение приведенного ко входу собственного шума                               | не более 0.001 Па |
| Рабочий диапазон температур                                                                           | -10°C – 40°C      |
| Обеспечивает работу на кабельную линию связи до 300 м и на активную нагрузку не менее 100 кОм         |                   |

### 2.3.2. Трассирование направлений распространения эруптивных облаков

Определение направления распространения эруптивного облака является важной задачей в рамках обеспечения безопасности движения аэротранспорта по заданным маршрутам.

Формирование и распространение эруптивных облаков происходит под действием условий стратификации атмосферы. Данные баллонного зондирования, которые проводятся два раза в сутки на метеорологической обсерватории «Ключи» Камчатского управления по

гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, дают возможность определять направление и скорость распространения эруптивных облаков от эксплозивных извержений СГВ, а метеорологическая обсерватория в г. Северо-Курильск Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, где также два раза в сутки проводится баллонное зондирование, позволяет получить данные стратификации атмосферы для определения параметров распространения эруптивных облаков от извержения вулкана Эбеко. Данные баллонного зондирования находятся в открытом доступе по ссылке <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/intl2000.wmo>.

В Институте космических исследований и распространения волн (ИКИР) ДВО РАН работает пеленгатор очень низких частот (ОНЧ, 8-12 кГц), позволяющий регистрировать электромагнитные импульсы от грозных разрядов. Прием электромагнитных импульсов осуществляется на две взаимно-перпендикулярных рамочные антенны для регистрации магнитной составляющей ( $H_{NS}$ ,  $H_{EW}$ ) и одну штыревую антенну для регистрации электрической составляющей ( $E_Z$ ). [Дружин Г.И., 2001]. С помощью ОНЧ – пеленгатора, расположенного в пункте «Карымшина» в 390 км от вулкана Безымянный, были зарегистрированы электромагнитные импульсы от вулканических гроз, возникавших во время эксплозивных извержений вулканов Безымянный и Шивелуч [Чернева Н.В., 2013]. Существующая мировая сеть определения координат электромагнитных импульсов от гроз World Wide Lightning Location Network (WWLLN, <http://webflash.ess.washington.edu/>), позволяет регистрировать электромагнитные импульсы от вулканических молний [Hutchins M.L., 2012]. К сожалению, из-за редкой сети пунктов в районе полуострова Камчатка, WWLLN регистрирует лишь только сильные грозные разряды от извержений вулканов Камчатки.

В рамках группы «KVERT» в Институте вуканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН в режиме реального времени с помощью приемной станции Унискан-36 ведется спутниковый мониторинг эксплозивной активности вулканов Камчатки [Гордеев, Гирина, 2014].

Представления о динамике извержения также могут быть получены на основе снимков спутника Японского метеорологического агентства Himawari-8, находящихся в прямом доступе. Основным инструментом на этом спутнике является 16-канальный многоспектральный тепловизор Advanced Himawari Imager, работающий как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне. Геостационарная орбита спутника позволяет сканировать Азиатско-Тихоокеанский регион с разрешением 500 м и максимальной частотой 0.1 цикл/мин ([http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html)).

## 2.4. Выводы к главе 2

Одновременная регистрация на одной эквипотенциальной поверхности  $V'$  ЭПА флюксметрами «Поле-2» и «ЭФ-4» на обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН (Камчатка) показали хорошую идентичность работы обоих флюксметров, расхождение результатов на уровне единиц процента.

Электростатический флюксметр «Поле-2» — это надежный и эффективный прибор, сыгравший огромную роль в изучении ЭПА в РФ, на сегодняшний день технически и морально устарел. В свою очередь «ЭФ-4» имеет современную элементную базу, малые габариты, надежный двигатель с питанием 12 В, с возможностью регистрации обтюратором «вниз». Разработанный на современной элементной базе с большим ресурсом работы и экономичным двигателем флюксметр «ЭФ-4», дает новые возможности наблюдений за  $V'$  ЭПА в полевых условиях. Возможность использования «ЭФ-4» в длительном автономном режиме, позволяет проводить натурные наблюдения за  $V'$  ЭПА вблизи действующих вулканов вдалеке от населенных пунктов.

Диссертантом с 2013 г. планомерно проведена работа по созданию сети пунктов непрерывной регистрации  $V'$  ЭПА вблизи действующих вулканов Камчатки – СГВ и на о. Парамушир в г. Северо-Курильск. Создан программно-аппаратный комплекс регистрации  $V'$  ЭПА на базе флюксметра «ЭФ-4», АЦП L-Card E24 и микрокомпьютера. Автоматизирована предварительная обработка исходных данных, которая выполняется программой-конвертором «SynCover». Данный аппаратно-программный комплекс обеспечивает возможность передачи данных, их анализ в режиме, близком к реальному времени с задержкой 1 сутки.

ЭПА сильно зашумлено из-за воздействия различных локальных факторов, поэтому для решения поставленных задач в первую очередь необходимо точно выделять возмущения  $V'$  ЭПА, связанные с эруптивными облаками. Для выделения возмущений, диссертантом проводился анализ записи вариаций  $V'$  ЭПА одновременно с динамикой извержений на основании геофизического мониторинга активности действующих вулканов Камчатки и в. Эбеко на о. Парамушир, в том числе на основании данных: сети РТСС, установленных вблизи действующих вулканов; инфразвуковых комплексов; визуального и видеонаблюдения. Направление распространения эруптивных облаков оценивалось на основании анализа данных: баллонного зондирования; мониторинга термальных аномалий по космическим снимкам и видео мониторинга; данных вулканических молний мировой сети WWLLN. Комплексный анализ геофизических данных обеспечивает качественную селекцию сигналов  $V'$  ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков.

### ГЛАВА 3. ВАРИАЦИИ ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Реализованная автором сеть пунктов наблюдения  $V'$  ЭПА (рис. 2.1) позволила зарегистрировать отклики в вариациях  $V'$  ЭПА от эруптивных облаков, которые сформировались в результате эксплозивных извержений вулканов Шивелуч, Безымянный (п-ов Камчатка) и вулкана Эбеко (о. Парамушир).

#### 3.1. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы на эруптивные облака эксплозивных извержений в. Шивелуч, п-ов Камчатка

Вулкан Шивелуч – самый северный из действующих вулканов Камчатки ( $56^{\circ}47'$  с. ш.,  $157^{\circ}56'$  в.д.) с высотой экструзивного купола 2500 м н.у.м. В последние десятилетие 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 ( $\sim 10$  км н.у.м.), а в поселках Ключи и Козыревск выпадает пепел. За период наблюдений 2013 – 2018 г. в KZY, KLY (рис. 2.1) зарегистрировано 4 отклика в вариациях  $V'$  ЭПА (табл. 3.1), связанных с мощными эксплозивными извержениями в. Шивелуч [Фирстов 2017, 2019, 2020].

Таблица 3.1. Параметры откликов  $V'$  ЭПА, зарегистрированных от эруптивных облаков извержений вулкана Шивелуч

| Событие | Дата       | $t_0$    | KZY                |             |                   | KLY              |             |                   |                              |
|---------|------------|----------|--------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|------------------------------|
|         |            |          | полярность         | $V'$ , кВ/м | $\Delta t$ , мин. | полярность       | $V'$ , кВ/м | $\Delta t$ , мин. | $\delta$ , гр/м <sup>2</sup> |
| 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           | $\sim 300$                   |
| Ш-4     | 30.12.2018 | 00:34:46 | Пункт не работал   |             |                   | –                | -0.59       | 90                | 80                           |

Примечание:  $t_0$  – время начала извержения.

Извержение 16 ноября 2014 г.

Все взрывные извержения вулкана Шивелуч сопровождаются сейсмическими сигналами, которые регистрируются сетью РТСС (рис. 2.14). По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) во время извержения 16 ноября 2014 г. высота эруптивной колонны составила 12 км н.у.м., такая оценка дана по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, 2015]. На сейсмических записях сейсмостанции BDR (рис. 2.14) выделяется сигнал с максимальной скоростью смещения грунта на всех трех сейсмометрах (N-S, W-E, Z) более 40 мкм/с в течение 13 минут. Время вступления сейсмического сигнала можно рассматривать как время начала взрывного извержения с точностью до секунды –  $t_0 \approx 10:17:55$ . На рис. 3.1а показан фрагмент регистрации взрывного землетрясения на вертикальной составляющей скорости смещения грунта. Для сигнала, сопровождающего взрывное извержение, и для фонового сигнала (микросейсмы до регистрации взрывного извержения) были рассчитаны спектральные плотности мощности (СПМ) (рис.3.1 в).

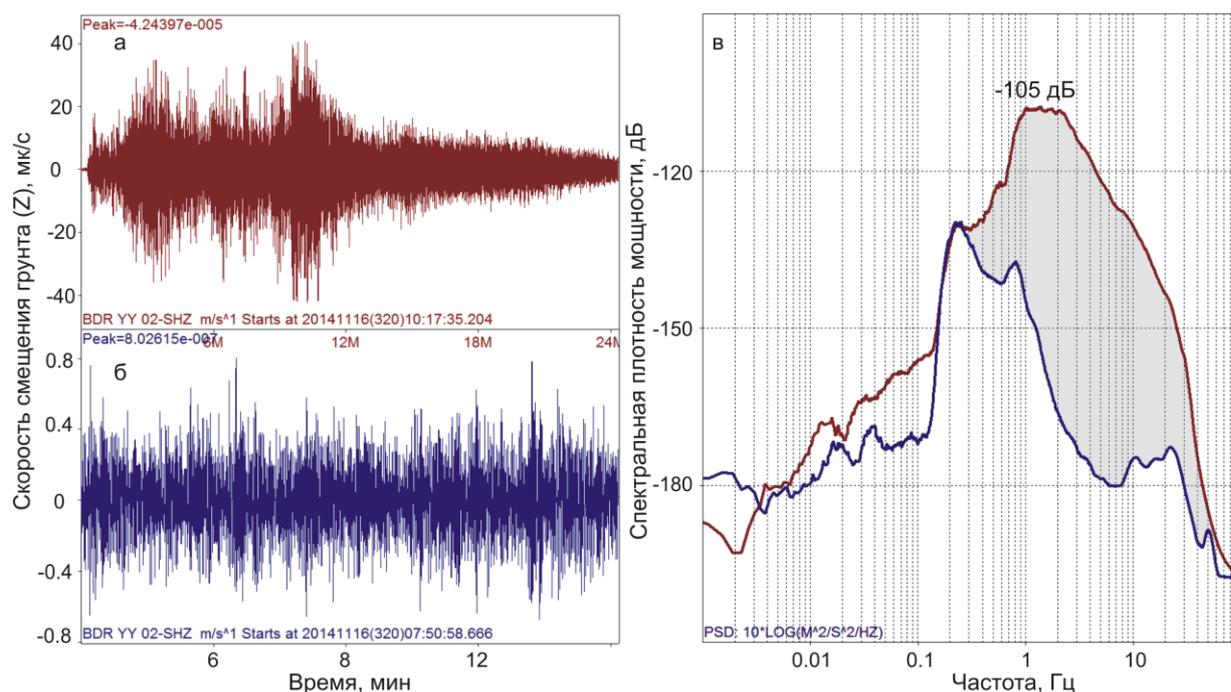


Рисунок 3.1 – а – Вертикальная компонента скорости колебания грунта сейсмического сигнала на BDR, сопровождавшего взрывное извержение 16.11.2014 г. вулкана Шивелуч; б – фрагмент фоновых микросейсм до взрывного извержения; в – спектральная плотность мощности фрагментов сейсмического сигнала вертикальной компоненты, красная линия – фрагмент во время взрывного извержения, синяя линия – фрагмент фоновых микросейсм

В интервале частот 0.4-20 Гц уровень СПМ для фрагмента записи взрывного извержения относительно фонового значения имеет хорошо выделенный максимум, при

этом максимальные амплитуда СПМ соответствует значению -105 дБ на частоте 1-2 Гц, что свидетельствует о взрывном характере эксплозивного извержения [Фирстов и др., 2012].

Представление о конфигурации сформировавшегося эруптивного облака дает спутниковый снимок (Landsat 8), полученный через 22 минуты после начала извержения (рис. 3.2а). Головная часть эруптивного облака близка к окружности диаметром  $\sim 30$  км и существенно нагружена пеплом (темная окраска). По данным баллонного зондирования атмосферы (<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 (рис. 3.2а), на этих высотах скорость ветра равна 11 м/с и 17 м/с (рис. 3.2г) северо-северо восточного направления с азимутом  $50^\circ$  и  $80^\circ$ , соответственно (рис. 3.2в). Высота нижней инверсии соответствует высоте тропопаузы, характерной для Камчатки в осенне-зимний период.

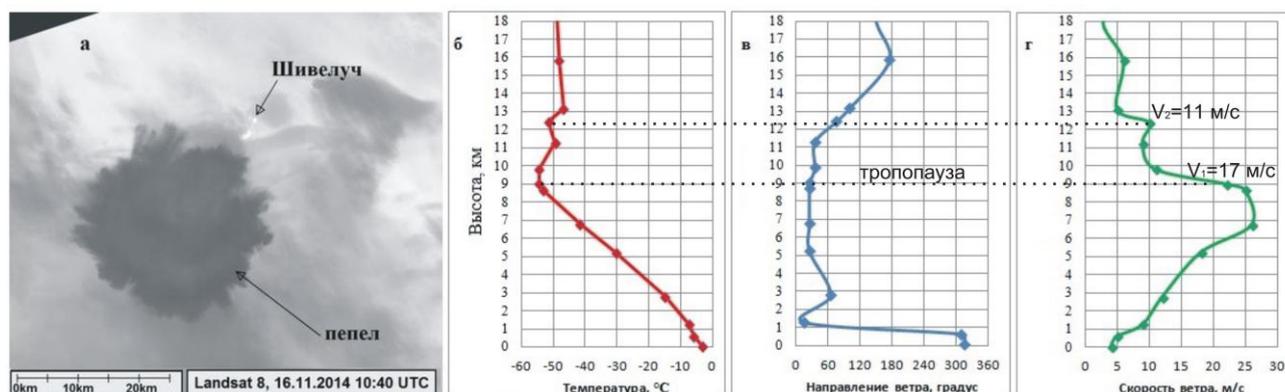


Рисунок 3.2 – а – Спутниковый снимок (Landsat 8) эруптивного облака эксплозивного извержения вулкана Шивелуч, выполненный в 10:40 16.11.2014 г.; данные метеорологической обсерватории «Ключи» на 12 часов 16 ноября 2014 г.: б – стратификация температуры; в – направления ветра; г – скорости ветра

Развитие эруптивного облака также прослеживается молниевыми разрядами, возникшими при его формировании и движении. Сетью WWLLN было зарегистрировано семь разрядов, время которых приведено в таблице 3.2, а местоположение отмечено на рис. 3.3б. На интервале 25-40 секунд 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 минут, предположительно, на фронте сносимого ветром эруптивного облака при его соприкосновении с более холодной облачной структурой. Последний разряд зарегистрирован через 17 мин на расстоянии 20.5 км от кратера вулкана (рис. 3.3б).

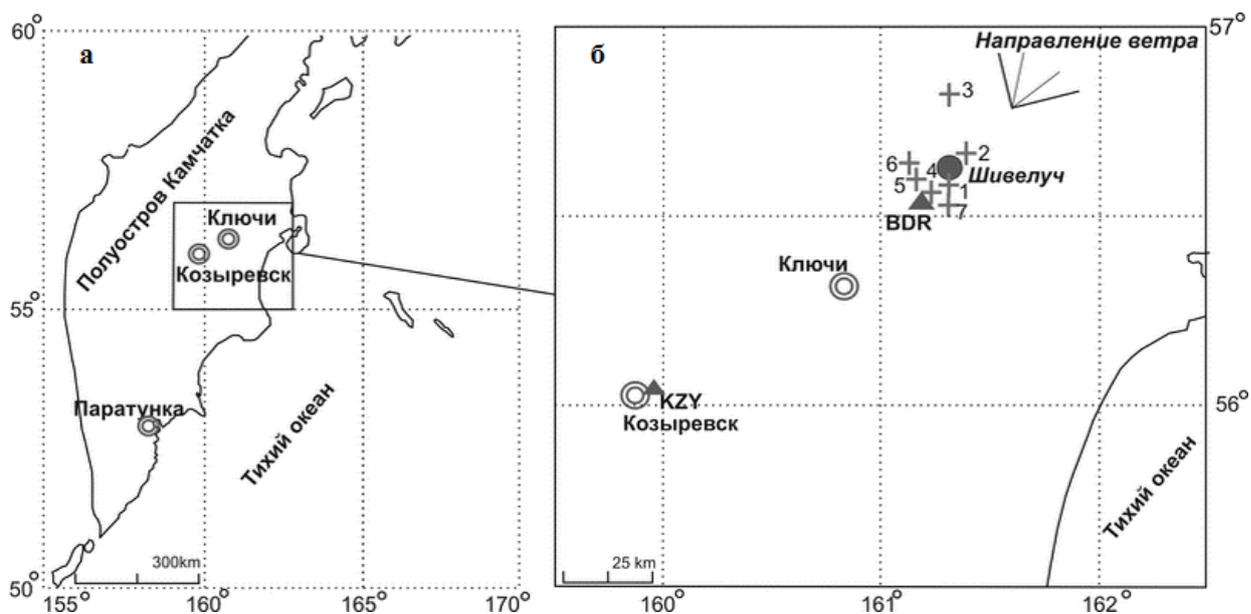


Рисунок 3.3 – а – Схема расположения пункта KZY на полуострове Камчатка; б – местоположение разрядов от вулканических молний во время извержения вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г.

В пункте KZY перед извержением фоновое значение  $V'$  ЭПА было относительно спокойное и составляло 0.06 кВ/м (рис. 3.4а). Поведение метеорологических величин для этого периода также было без сильных вариаций (рис. 3.4в-д), что говорит об условиях хорошей погоды в этот период. 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 1.5 часа (рис. 3.4а,б), когда в максимуме значение  $V'$  ЭПА достигает 0.17 кВ/м. Наличие условий хорошей погоды дает основание рассматривать вариации  $V'$  ЭПА, как следствие электризации эруптивного облака, траектория которого проходила в 25 км восточнее пункта KZY в соответствии с атмосферной стратификацией (рис.3.2 б, в, г).

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:  $Q = V' \cdot (2\pi\epsilon_0 R_{\min}^3 / z)$ , где:  $\epsilon_0$  - 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.

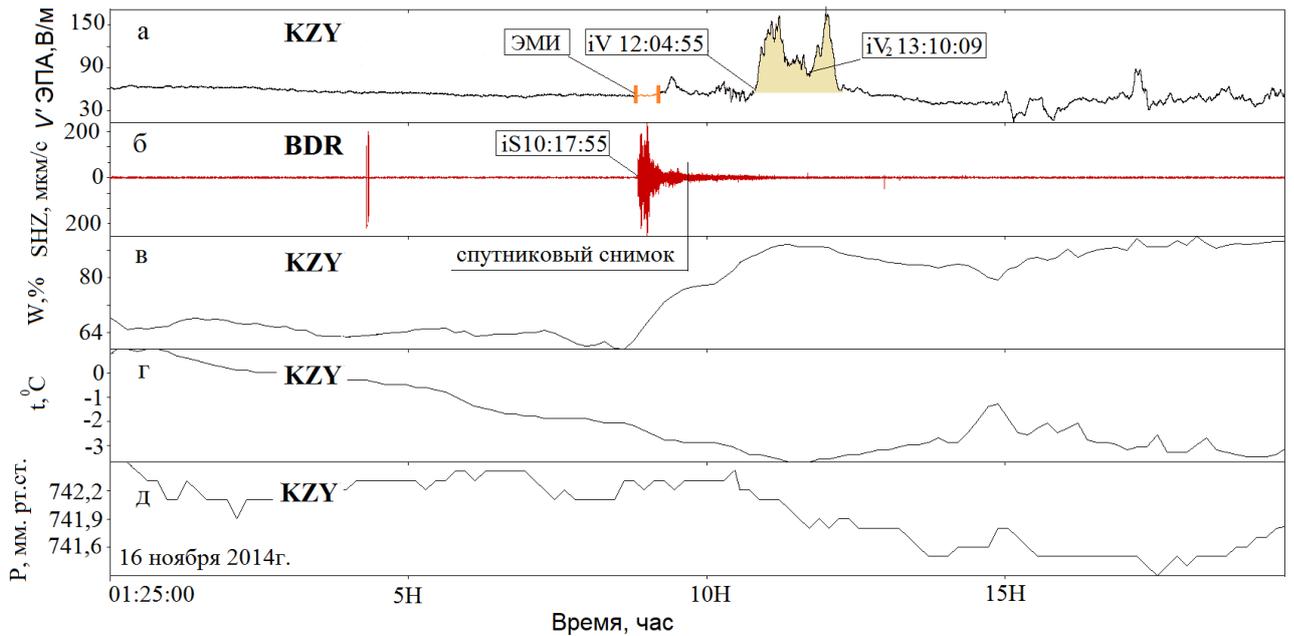


Рисунок 3.4 – а – Вариации градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $V'$  ЭПА) в пункте KZY; б – запись сейсмического сигнала, сопровождавшего извержение вулкана Шивелуч 16.11.2014 г. на BDR; в, г, д – метеорологические параметры в пункте KZY

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.

На рис. 3.5а видно, что перед хорошо выраженными аномалиями  $V'$  ЭПА в течение 78 минут наблюдаются более «высокочастотные» колебания с амплитудой  $\sim 0.01$  кВ/м. Сами аномалии также осложнены «высокочастотными» колебаниями. Сигнал длительностью более трех часов был разделен на пять участков, и подвергся фильтрации фильтром высокой частоты с  $f_{\text{гр}} = 0.83$  мГц (20 мин). На отфильтрованном сигнале по кинематическим и динамическим параметрам выделенные участки достаточно уверенно различаются (рис.3.5б).

Начало сигнала почти совпадает со временем последнего разряда от вулканической молнии, которая произошла на расстоянии 20 км от KZY (табл. 3.2). На первом участке, также, как и на последнем, в записях вариаций  $V'$  ЭПА «высокочастотного» диапазона регистрируются колебания с периодом 12-15 минут. Для второго и третьего участков характерны колебания с меньшим периодом – 5-6 минут. 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.

Таблица 3.2. 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   |

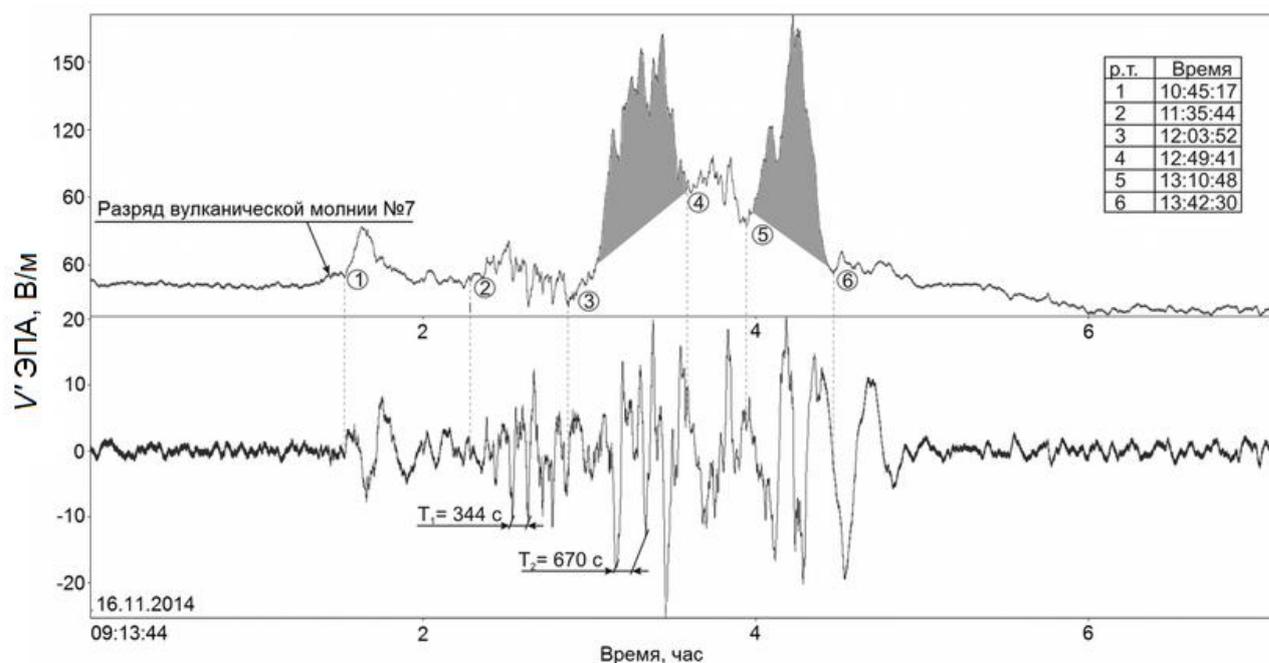


Рисунок 3.5 – а – Фрагмент записи градиента потенциала ЭПА в пункте KZY с выделением характерных реперных точек; б – кривая V' ЭПА после фильтра высоких частот с  $f_{гр} = 0.83$  мГц (20 мин)

#### Извержение 16 декабря 2016 г.

Во время извержения в. Шивелуч 16 декабря 2016 г. в 22:31 по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) высота эруптивной колонны, оцененная по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, Сенюков, 2015], составила 5.6 км н.у.м. Спустя ~2 часа в п. Ключи был отмечен пеплопад, интенсивность которого составила 20 гр/м<sup>2</sup>.

Эксплозивное землетрясение на SMK длительностью  $\sim 15$  минут, сопровождавшее извержение 16 декабря 2016 г., довольно слабое ( $A_{\max}=4$  мкм/с) и сильно зашумлено помехами. На рис. 3.6а показан фрагмент записи скорости смещения грунта вертикальной компоненты. Рассчитаны СПМ (рис. 3.6в) для фрагмента с регистрацией землетрясения (рис. 3.6а) и для фрагмента фонового значения микросейсм (рис. 3.6б), которые были зарегистрированы до извержения. В интервале частот 0.4-10 Гц уровень СПМ относительно фона почти постоянен с максимумом  $-128$  дБ на 1.1 Гц, что не характерно для эксплозивного землетрясения [Фирстов и др., 2012]. Акустический сигнал на записях микробарографа ближайшего пункта KLY обнаружен не был. Таким образом, это извержение можно охарактеризовать как «продувку», то есть длительное истечение пепло-газовой смеси.

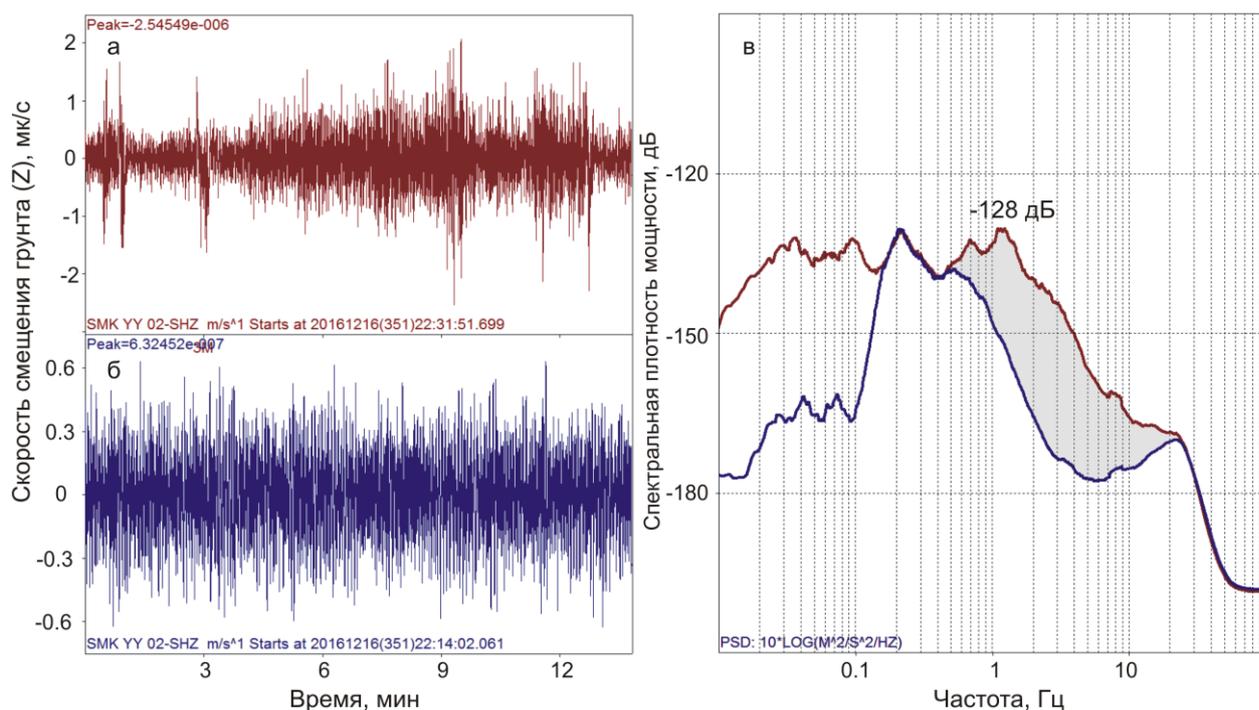


Рисунок 3.6 – а – Вертикальная компонента скорости колебания грунта сейсмического сигнала на SMK, сопровождавшего эксплозивное землетрясение 16.12.2016 г. вулкана Шивелуч; б – фрагмент фоновых микросейсм до эксплозивного землетрясения; в – спектральная плотность мощности фрагментов сейсмического сигнала вертикальной компоненты, красная линия – фрагмент эксплозивного землетрясения, синяя линия – фрагмент фоновых микросейсм

Рассмотрим картину распространения эруптивного облака этого извержения по доступным космическим снимкам совместно с ветровой стратификацией по данным баллонного зондирования в этот период времени. На космических снимках, полученных в режиме реального времени на приёмной станции Унискан-36 с полуторачасовым интервалом, видно, что эруптивное облако движется под действием ветра с азимута  $\sim 75^\circ$  со

скоростью  $\sim 17$  м/с, согласно этим данным пепел не должен был выпасть в пос. Ключи (рис 3.7 а,б). Этот азимут и скорость ветра соответствует стратификации атмосферы на интервале высот 6.5-8.0 км (рис. 3.7в).

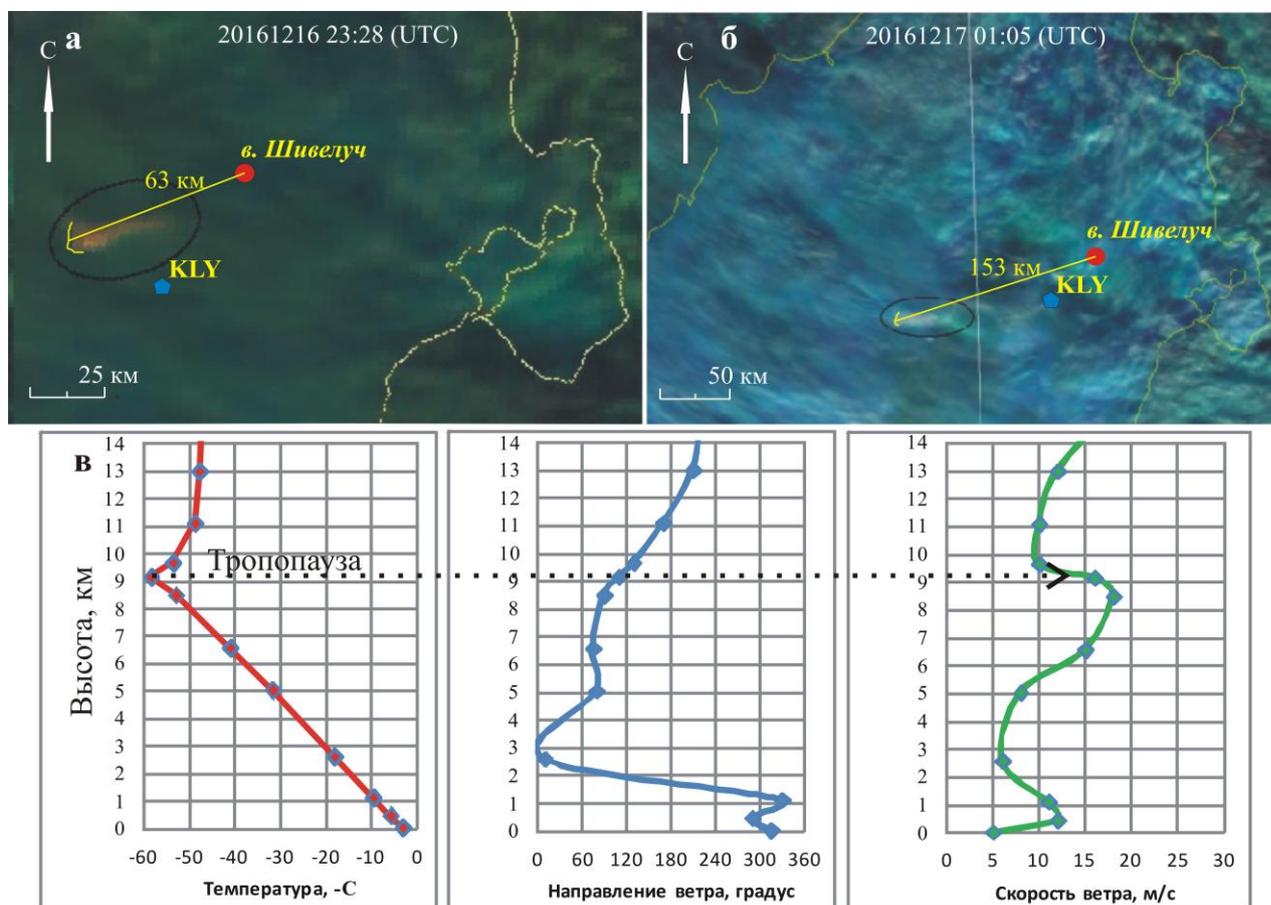


Рисунок 3.7 – Распространение эруптивного облака от извержения вулкана Шивелуч 17.12.2016 в 22:31 и стратификация атмосферы в этот период. а, б – спутниковые снимки (Terra MODIS) эруптивного облака, полученные в режиме реального времени на приёмной станции Унискан-36 ИВиС ДВО, в - температурная и ветровая стратификация атмосферы по данным баллонного зондирования на метеостанции Ключи в 17.12.2016 в 00:00

Эруптивное облако, причастное к пеплопаду в пос. Ключи, должно было сноситься ветром с азимутом  $\sim 45^\circ$  и скоростью  $\sim 5$  м/с, что соответствует стратификации атмосферы на высоте 2.5 км. На спутниковых снимках эруптивное облако в этом направлении не просматривается (рис. 3.7а). Выпадения пепла в п. Ключи сопровождалось однополярным отрицательным возмущением в  $V'$ ЭПА с минимальным значением  $-1.23$  кВ/м и общей длительностью  $\sim 45$  минут (15 минут передний фронт и 30 задний) (рис. 3.8). По форме заднего фронта отклика в  $V'$ ЭПА [Чернева и др., 2007] можно говорить, что эруптивное облако представляло собой тонкое образование,двигающееся горизонтально на высоте 2.5 км. За счет эоловой дифференциации облако приобрело значительный горизонтальный

размер ( $l=9$  км), который оценен по длительности заднего фронта отклика  $V'$  ЭПА и скорости ветра на высоте 2.5 км.

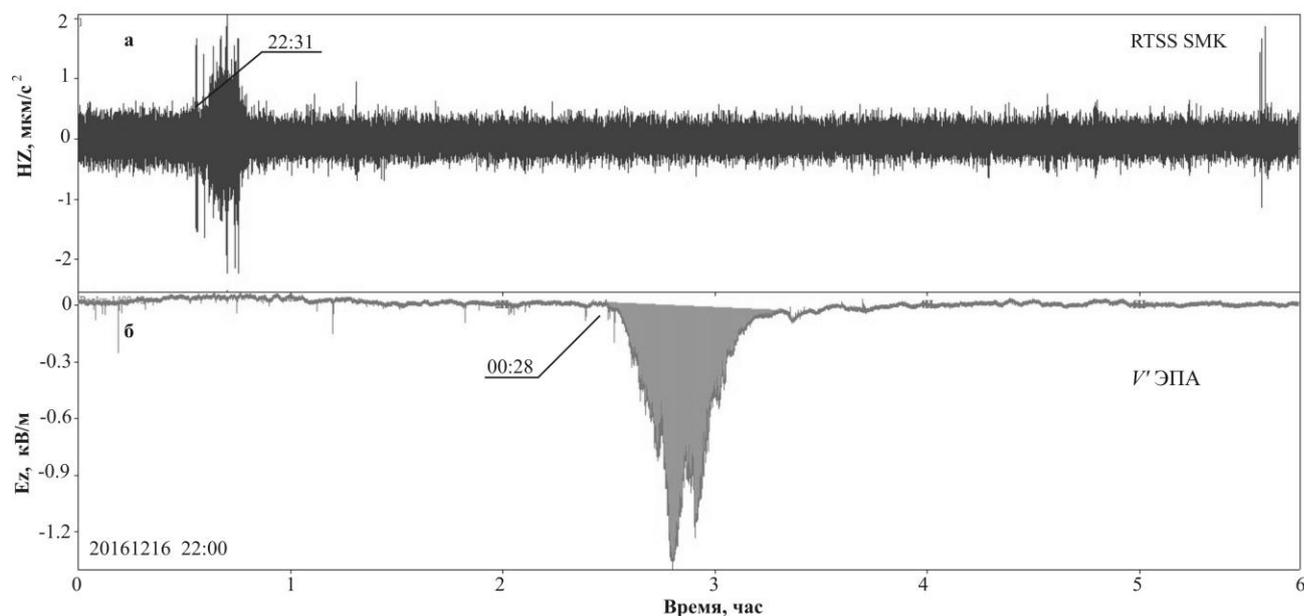


Рисунок 3.8 – а – Фрагмент записи землетрясения на вертикальной компоненте скорости смещения грунта ( $Z$ ), связанного с эксплозией в. Шивелуч 16 декабря 2016; б – фрагмент регистрации  $V'$  ЭПА с откликом, связанным с выпадением пепла в п. Ключи

На основании комплексного анализа данных были восстановлены кинематические параметры распространения эруптивного облака. Эти данные позволили оценить электростатический заряд для эруптивного облака по формуле:  $Q = V' \cdot (2\pi\epsilon_0 R_{\min}^3 / z)$ , где:  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $R_{\min} = 0$  км минимальное расстояние от регистратора до горизонтальной проекции траектории эруптивного облака,  $z = 2.5$  км высота распространения эруптивного облака. Заряд эруптивного облака оценен в 0.85 Кл.

#### 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 колонны, оцененная по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, Сенюков, 2015], составила  $\sim 12$  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. 3.9а. показан фрагмент записи скорости смещения грунта вертикальной компоненты. Рассчитаны СПМ (рис. 3.9г) для фрагмента, на котором сигнал от эксплозивного землетрясения не ограничен диапазоном регистрации аппаратуры (рис. 3.9б) и для фрагмента фонового значения микросейсм (рис.

3.9в), которые были зарегистрированы до взрывного землетрясения. СПМ для трехминутной записи взрывного землетрясения имеет максимум на частоте 1 Гц и заключена в пределах 0.4-10 Гц, что характерно для взрывного землетрясения [Фирстов и др., 2012].

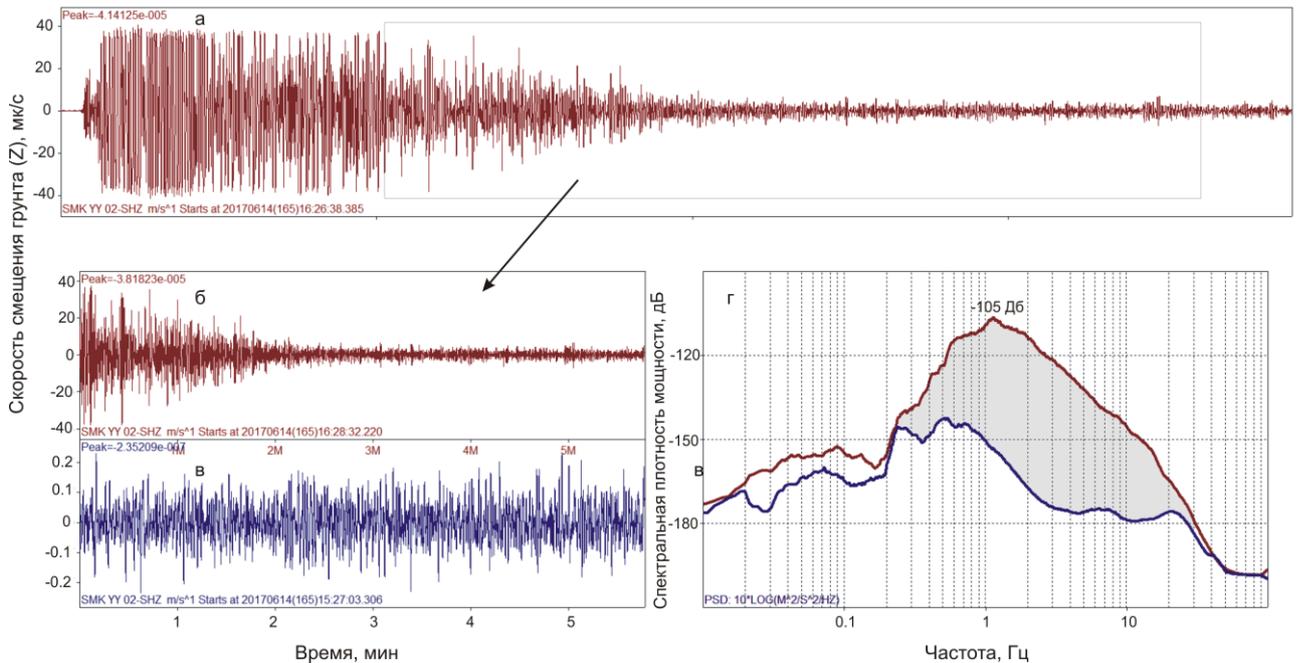


Рисунок 3.9 – а – Вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на SMK, сопровождавшего взрывное землетрясение 14.06.2017 г. вулкана Шивелуч; б – фрагмент сейсмического сигнала вертикальной составляющей взрывного землетрясения, который не ограничен диапазоном регистрирующей аппаратуры; в – фрагмент фоновых микросейсм до взрывного землетрясения; г – спектральная плотность мощности фрагментов сейсмического сигнала вертикальной компоненты: красная линия - фрагмент взрывного землетрясения; синяя линия - фрагмент фоновых микросейсм

Данное извержение сопровождалось воздушной ударной волной, которая с расстоянием эволюционировала в инфразвуковую и была зарегистрирована всеми микробарографическими каналами на п-ве Камчатка (рис. 3.10). Время задержки акустического сигнала относительно сейсмического сигнала на SMK, который можно считать за начало 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.

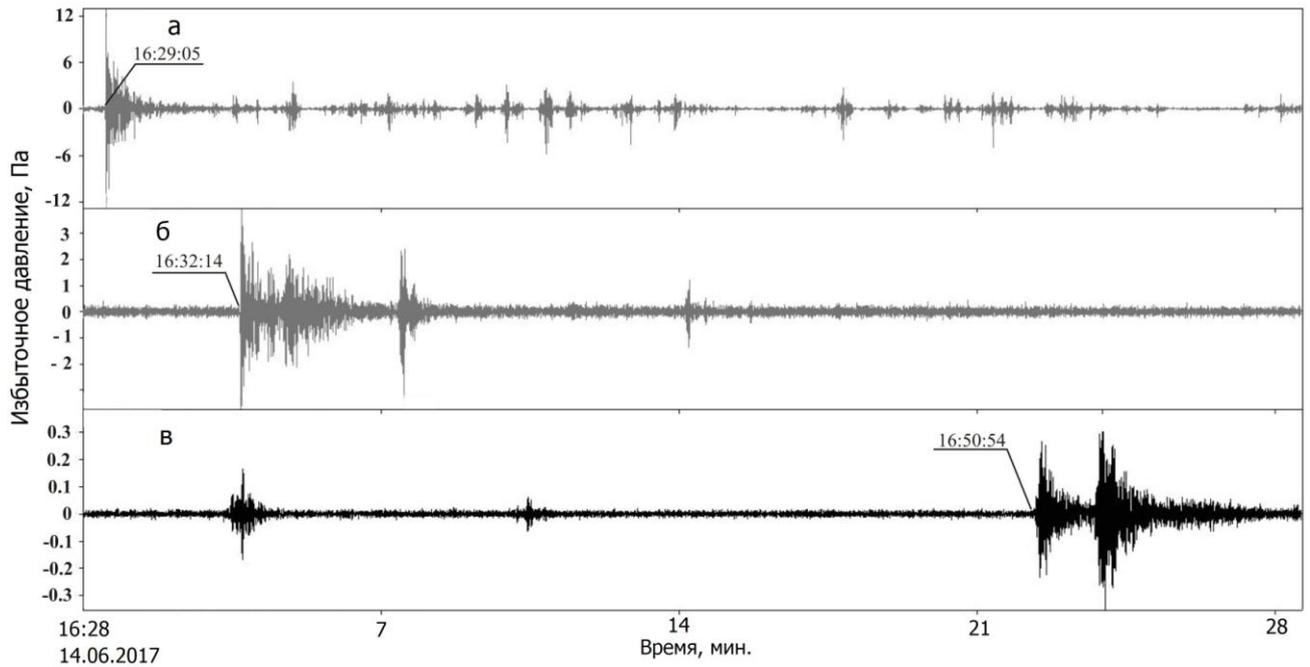


Рисунок 3.10 – Запись воздушной волны, сопровождавшей извержение 14.06.2017 г., на акустических станциях: а – KLY; б – KZY; в – IS44

На спутниковых снимках (HIMAWARI-8 данные Regional and Mesoscale Meteorology Branch NOAA/NESDIS, <http://rammb.cira.colostate.edu/>) видно, что через 34 минуты после извержения сформировалось почти круговое эруптивное облако диаметром  $\sim 70$  км на высоте 9 км (рис. 3.11а). Далее, согласно ветровой стратификации, эруптивное облако стало двигаться к поселку Ключи со скоростью 12 м/с (рис. 3.11а, 3.11б, 3.11в). Формирование эруптивного облака в первые минуты после начала эксплозивного извержения зафиксировано на станции KLY видеокамерой комплекса геофизического мониторинга активности вулкана Шивелуч (см. рис. 11г).

Почти через час эруптивное облако распространялось над поселком Ключи, где выпало  $100 \text{ г/м}^2$  пепла (см. рис. 3.11), после чего продолжило движение по направлению к Ключевскому вулкану (см. рис. 3.11е). В 21:33 достигло поселка Козыревск, где наблюдалось слабое выпадение очень мелкодисперсного пепла.

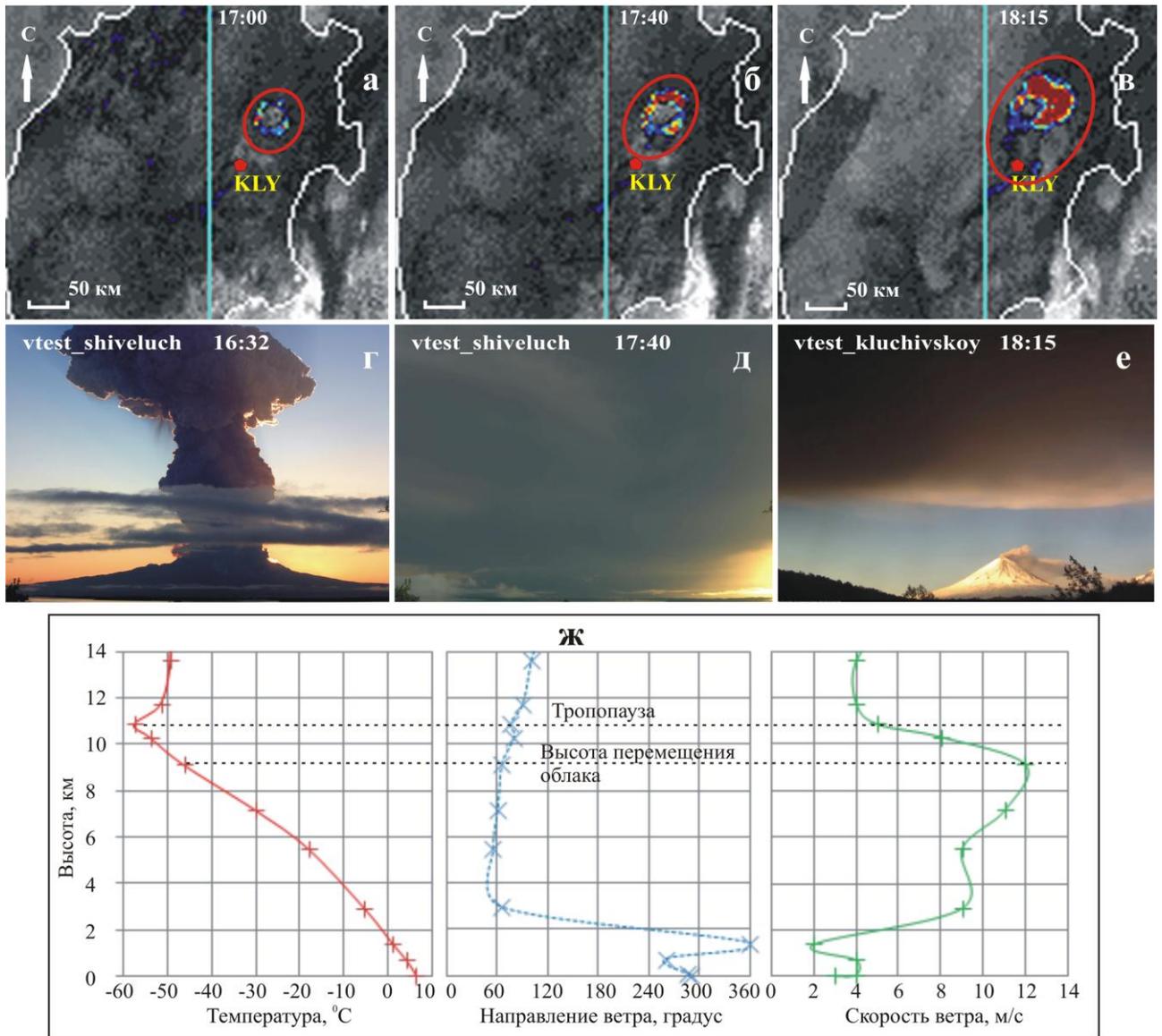


Рисунок 3.11 – Распространение эруптивного облака от извержения вулкана Шивелуч 14.06.2017 г.: а, б, в – в 16:26 по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8 (<http://rammb.cira.colostate.edu>); г, д, е – развитие эруптивного облака, зафиксированное видеокамерой; ж – температурная и ветровая стратификации атмосферы по данным баллонного зондирования

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. При этом верхняя часть эруптивного облака, согласно спутниковым данным, распространялась в северо-северо-западном направлении (рис.3.11в), поэтому суммарное электростатическое поле, наведенное на KLY от эруптивного облака, обусловлено объемными зарядами, сформированными в средней и нижней его областях. С 17:40 на KLY началось уменьшение  $V'$  ЭПА до -6 кВ/м, которое затем сменилось резким увеличением  $V'$  ЭПА до +5 кВ/м (рис. 3.12). 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. Значительно большая амплитуда отрицательной фазы по сравнению с событием Ш-2 (табл.3.1) согласуется со значительно большим количеством выпавшего пепла  $\sim 100 \text{ г/м}^2$  в поселке Ключи.

В работе [Чернева и др., 2007] рассчитан отклик в  $V'$  ЭПА от объемных зарядов с простой конфигурацией, транспортируемых ветром и расположенных над проводящей поверхностью, приведены модельные кривые в безразмерных величинах. Согласно базовым моделям, по форме отклика  $V'$  ЭПА можно предположить, что структура объемных зарядов в эруптивном облаке представляла собой наклонный диполь, ось которого определена условиями ветровой стратификации атмосферы и ориентирована вдоль движения, проходила через KLY. По-видимому, диполь сформировался за счет эоловой дифференциации и за счет седиментации продуктов извержения в гравитационном поле, когда в передней части эруптивного облака средние и мелкие частицы пепла были заряжены отрицательно, а отстающая нижняя часть облака, нагруженная наиболее крупным пеплом - положительно.

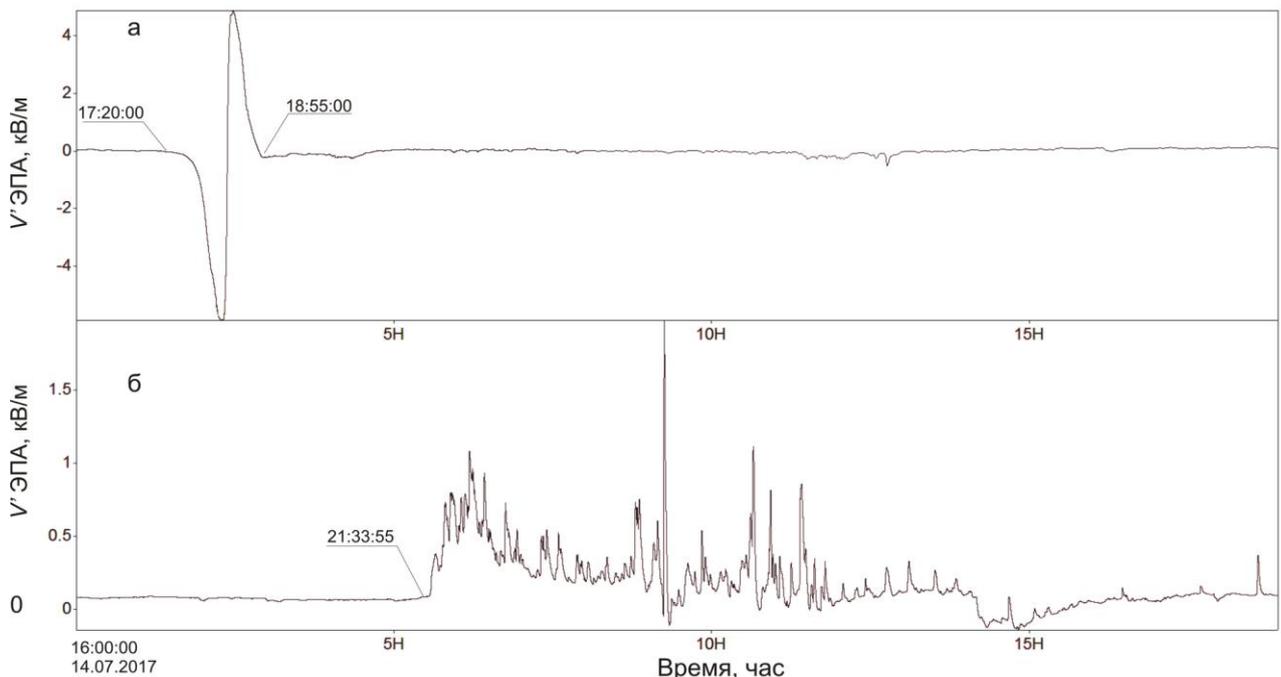


Рисунок 3.12 – Фрагменты записи: а – градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY; б – KZY

На основе 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. Подробный расчет приведен в 4 главе диссертации.

Почти через 5 часов эруптивное облако достигло п. Козыревск, где отмечалось выпадение незначительного количества мелкодисперсного пепла. Флюксметром в KZY был зарегистрирован отклик положительной полярности длительностью более 6 часов, 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.

Таким образом, если в KLY (48 км от вулкана) эруптивное облако имело электрическую структуру в виде диполя, то в KZY (110 км от вулкана) его электрическая структура эволюционировала в положительно заряженное облако.

### 3.2. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы от эруптивных облаков эксплозивных извержений в. Безымянный, п-ов Камчатка

Один из наиболее активных вулканов мира – Безымянный ( $55.98^\circ$  N,  $160.59^\circ$  E, высота 2869 м н.у.м.), расположен в центральной части Ключевской группы вулканов на полуострове Камчатка (рис. 2.1).

За период наблюдений 2013 – 2022 г. в KLY зарегистрировано 2 события (табл. 3.4), связанных с мощными эксплозивными извержениями в. Безымянный [Firstov, 2021].

Таблица 3.4. Параметры откликов  $V'$  ЭПА, зарегистрированных от эруптивных облаков извержений вулкана Безымянный

| Событие | Дата       | $t_0$    | KLY        |               |                   |                              |
|---------|------------|----------|------------|---------------|-------------------|------------------------------|
|         |            |          | полярность | $V'$ , кВ/м   | $\Delta t$ , мин. | $\delta$ , гр/м <sup>2</sup> |
| Б-1     | 20.05.2017 | 3:39:24  | –          | -0.09   -0.08 | 20   90           | пепел не выпадал             |
| Б-2     | 15.03.2022 | 12:51:19 | +          | 1.3           | 75                | пепел не выпадал             |

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, Сеньюков, 2015], составила ~15 км.

Из записей BZW, BZP эксплозивного землетрясения, возникшего во время извержения, следует, что извержение началось в 3:39:24 20.12.2017. В первые ~5 минут интенсивность сейсмического сигнала плавно нарастала, после чего уровень сигнала резко возрос и в течение дальнейших 4 минут 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. 3.13а). Затем амплитуда сигнала уменьшилась и почти ~5 минут сохранялась квазипостоянной с дальнейшим спадом до фона через 10 минут (рис. 3.13а).

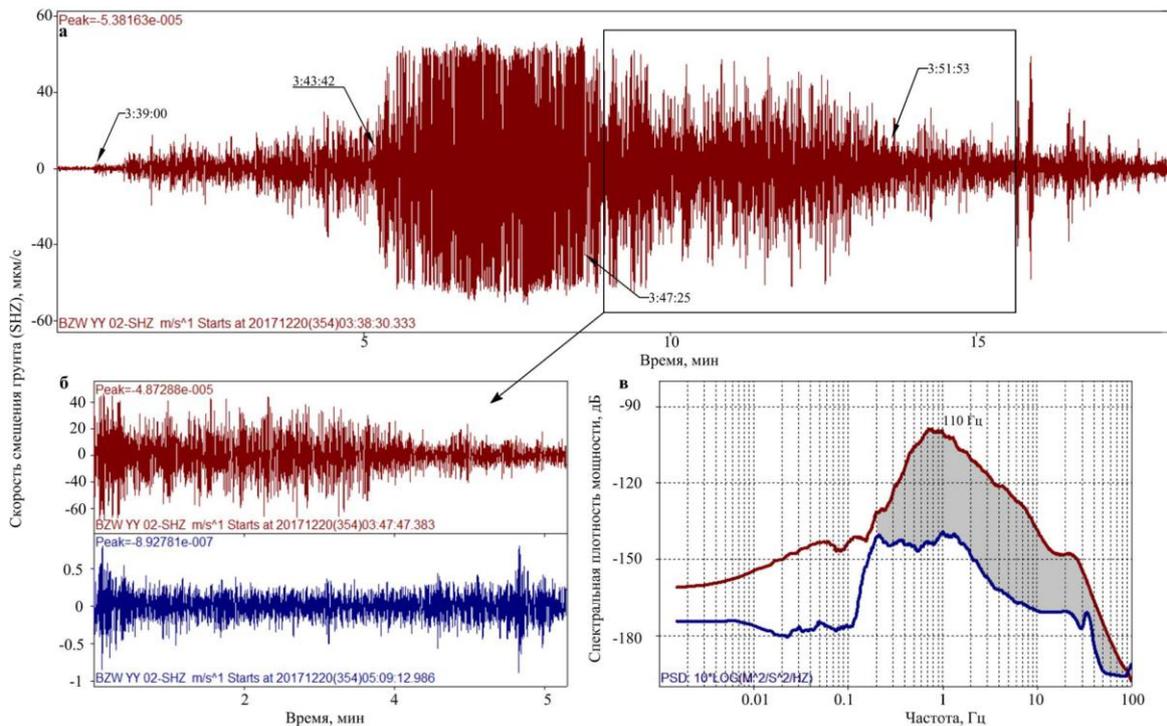


Рисунок 3.13– а –Вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на BZW, сопровождавшего эксплозивное землетрясение 20.12.2017 г. вулкана Безымянный; б – фрагмент сейсмического сигнала вертикальной составляющей эксплозивного землетрясения, который не ограничен диапазоном регистрирующей аппаратуры; в – фрагмент фоновых микросейсм после эксплозивного землетрясения; г – спектральная плотность мощности фрагментов сейсмического сигнала вертикальной компоненты: красная линия - фрагмент эксплозивного землетрясения; синяя линия - фрагмент фоновых микросейсм

Рассчитаны СПМ (рис. 3.13в) для фрагмента, на котором сигнал от эксплозивного землетрясения не ограничен диапазоном регистрации аппаратуры (рис. 3.13б) и для фрагмента фонового значения микросейсм (рис. 3.13б), которые были зарегистрированы после эксплозивного землетрясения. СПМ для пятиминутной записи эксплозивного землетрясения имеет максимум на частоте 1 Гц и заключена в пределах 0.2-10 Гц, что характерно для эксплозивного землетрясения [Фирстов и др., 2012].

Согласно данным баллонного зондирования, выполненного на метеостанции Камчатского УГМС в п. 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 (рис. 3.14 в). Направление и скорость распространения эруптивного облака хорошо прослеживается на спутниковых снимках Himawari-8 (<http://dvrcpod.planeta.smislab.ru/animation/1513757110.gif>). По данным [Girina O.A., 2013] площадь территории, над которой распространялось облако, составила  $\sim 78\ 000\ \text{км}^2$  (рис. 3.14б). Масса тефры этого извержения, отложившаяся на суше, по модельным расчётам составила  $\sim 3 \cdot 10^7$  т (объем  $\sim 0.023\ \text{км}^3$ ). Протяжённость отложений пирокластических потоков составляла 6 км и грязевых потоков до 18 км. Интенсивное схождение пирокластических потоков, по всей видимости, отражено на сейсмической записи и соответствует III участку (рис. 3.13а). При попадании пирокластических потоков в зону торможения возникали вторичные эруптивные облака. Этот процесс способствовал созданию многоярусности эруптивного облака.

Ось пеплопада прошла в  $\sim 20$  км от KLY (рис. 3.14 б), пепел в пункте наблюдения не выпадал. Условия хорошей погоды позволили зарегистрировать электростатическим флюксометром отклик в вариациях  $V'$  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, и длительностью 20 и 90 минут (рис. 3.15). 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  $\sim 13$  км, со скоростью  $\sim 20$  м/с, а второй на 8 км со скоростью распространения  $\sim 10$ -12 м/с. Такие параметры распространения соответствуют времени начала откликов в вариациях  $V'$  ЭПА.

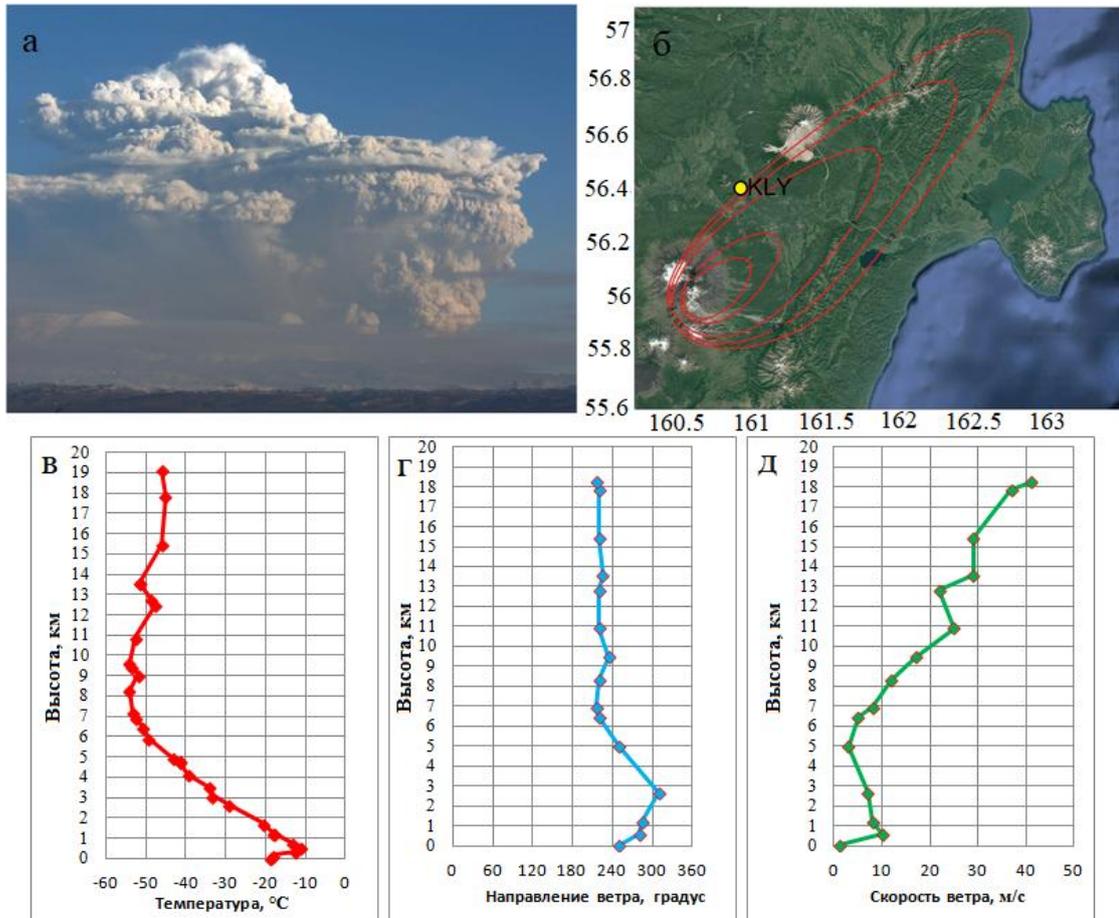


Рисунок 3.14 – а – Снятое из KZY эруптивное облако на момент времени 03:59; б – расчетные изопакиты для отложений пироклаستيку извержения 20.12.2017 по [Girina et al., 2018]; в – вертикальные разрезы метеорологических величин по данным баллонного зондирования в 00:00 20.12.2017 г.

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  $\sim 13$  км, а второй на 8 км. Объемный заряд для обеих частей эруптивного облака рассчитывался исходя из его траектории и зарегистрированного отклика в поле  $V'$  ЭПА по формуле:  $Q = V' \cdot (2\pi\epsilon_0 R_{\min}^3 / z)$ , где:  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $R_{\min} = 25$  км минимальное расстояние от регистратора до горизонтальной проекции траектории эруптивного облака,  $z = 13$  км высота распространения эруптивного облака. Заряд эруптивного облака составил -9 и -7.5 Кл, соответственно.

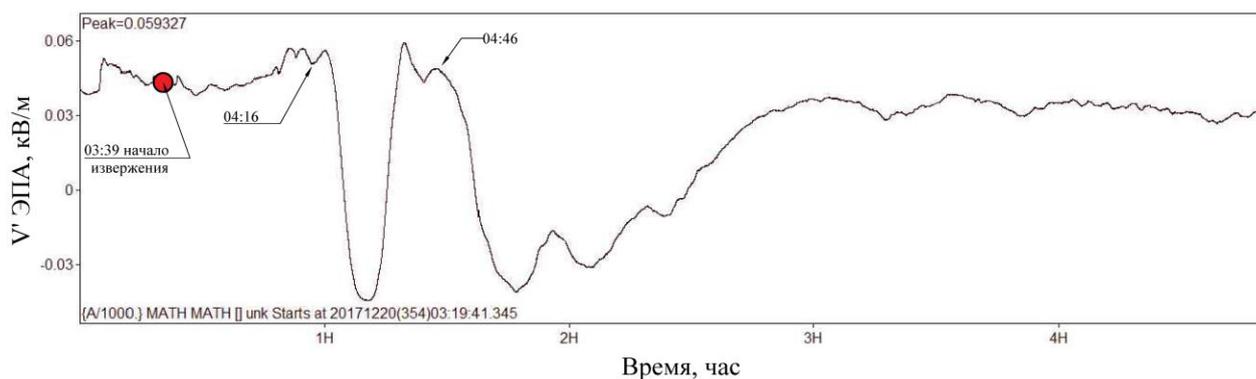


Рисунок 3.15 – Отклик в вариациях градиента потенциала электрического поля атмосферы в пункте KLY от эруптивного облака

Комплексный анализ данных мониторинга активности вулканов позволил восстановить параметры распространения эруптивного облака. 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.

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. 3.16а), характер извержения данного события был взрывным, о чем свидетельствуют сравнительные данные СПМ для фрагмента записи эксплозивного землетрясения и фонового значения микросейсм (рис. 3.16в). Максимальная высота эруптивного облака оценена в  $\sim 11$  км н.у.м.

В этом случае верхняя область эруптивного облака распространялась преимущественно в северном направлении ( $180-210^\circ$ ), в соответствии с ветровой стратификацией на высоте 10-11 км со скоростью 5-8 м/с (рис. 3.17д, е), его нижняя область распространялась на высоте 6-10 км в север-северо-западном направлении ( $150^\circ$ ) со скоростью 9-12 м/с (рис. 3.18 д, е). По данным Японского метеорологического агентства ([http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](http://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 (рис. 3.18а, б, в, д, е). Таким образом, в этом случае над KLY распространялась верхняя область эруптивного облака на высоте тропопаузы и выше (рис. 3.18г).

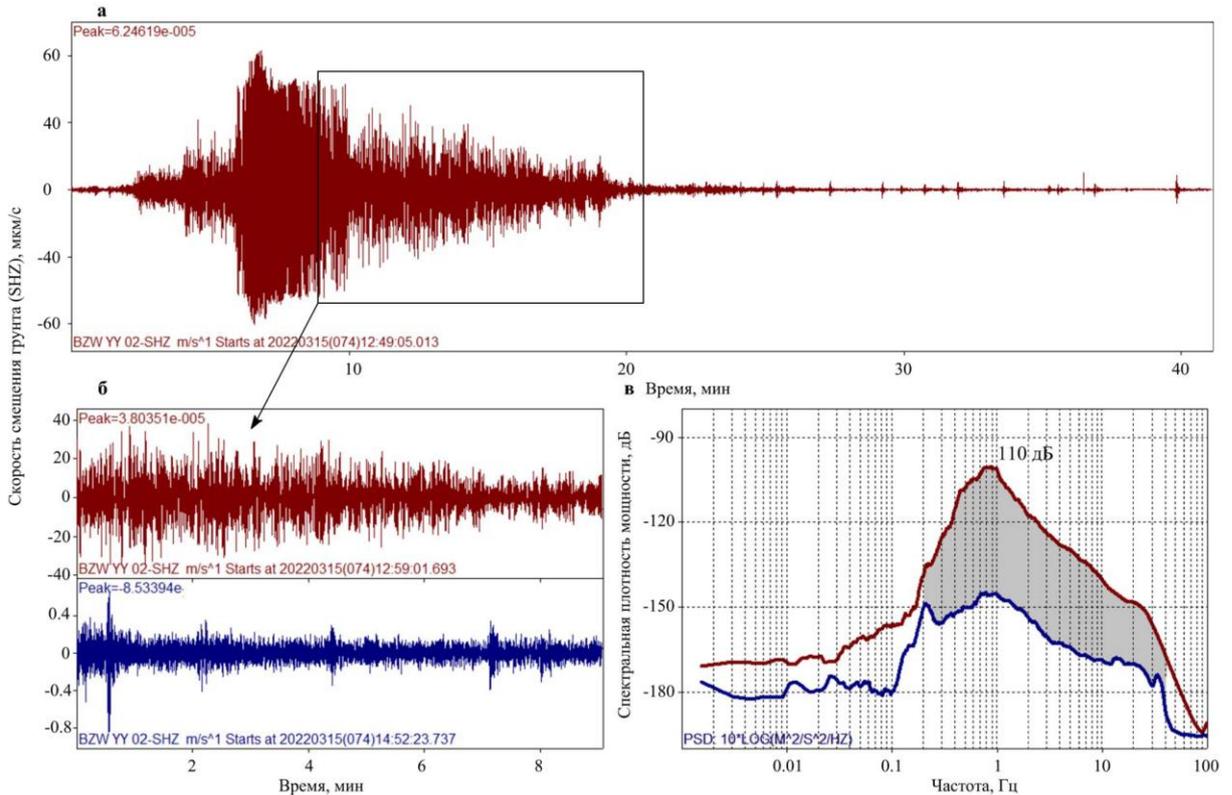


Рисунок 3.16 – а – Вертикальная компонента скорости смещения грунта сейсмического сигнала на BZW, сопровождавшего эксплозивное землетрясение 15.03.2022 г. вулкана Безымянный; б – фрагмент сейсмического сигнала вертикальной составляющей эксплозивного землетрясения, который не ограничен диапазоном регистрирующей аппаратуры; в – фрагмент фоновых микросейсм после эксплозивного землетрясения; г – спектральная плотность мощности фрагментов сейсмического сигнала вертикальной компоненты: красная линия - фрагмент эксплозивного землетрясения; синяя линия - фрагмент фоновых микросейсм

В период времени с 13:30 до 14:30 в вариациях  $V'$  ЭПА был зарегистрирован отклик с положительным возмущением (рис. 3.17), 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.



Рисунок 3.17 – Фрагменты записи градиента потенциала электрического поля атмосферы в KLY

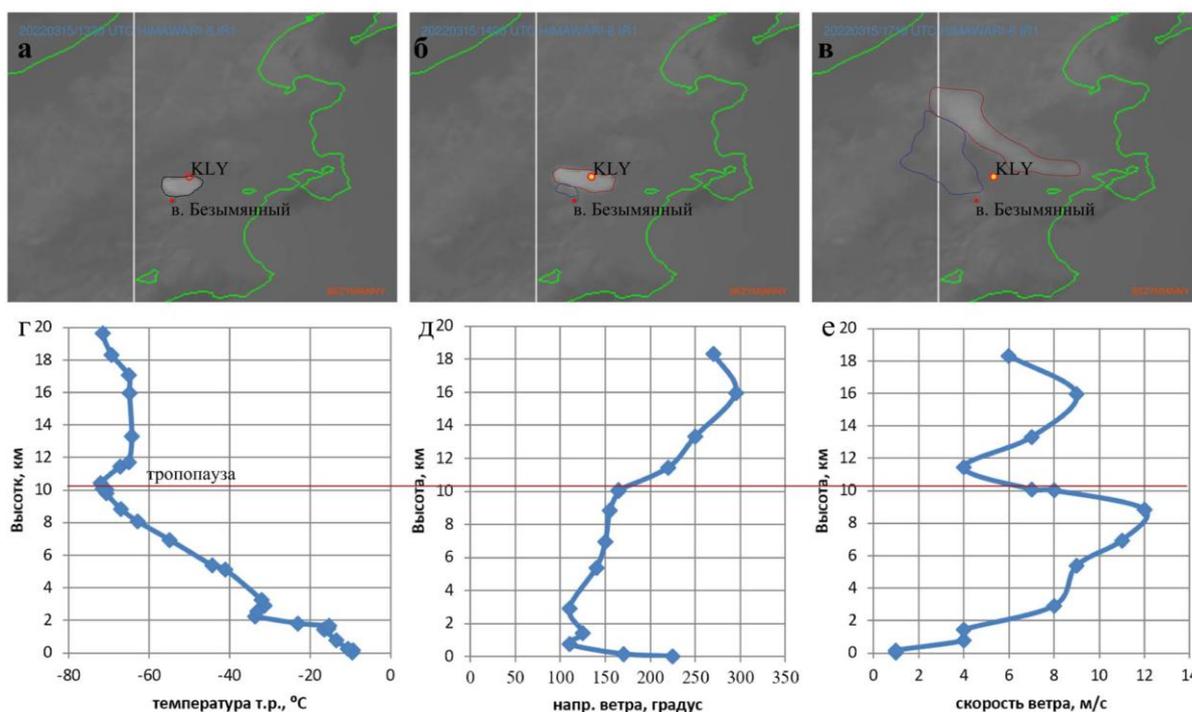


Рисунок 3.18 – Стадии распространение эруптивного облака по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8 (<http://rammb.cira.colostate.edu>): развитие эруптивного облака на а – 13:00; б – 14:00; в – 17:00; данные высотного зондирования п. Ключи 15.03.2022 12:00: г – температурная стратификация атмосферы; д, е – ветровая стратификация атмосферы

Благодаря неоднородной стратификации атмосферы рис. 3.18 в момент извержения, эруптивное облако оказалось растянутым, с наблюдаемым азимутальным угловым размером в  $22.5^\circ$ , относительно станции «Карымшино» рис. 2.1, где расположен пеленгатор электромагнитных импульсов (ЭМИ) работающий в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) [Firstov, 2020 Malkin, 2021]. Анализ данных ОНЧ - пеленгатора, подтвердил наличие грозового очага в азимутальных углах от  $8.2^\circ$  до  $27^\circ$ . При этом максимальная скорость счета, составила 83 имп/мин общее количество зарегистрированных импульсов составило 1138. Азимут прихода импульсного излучения, 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 минут 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  $8,2^\circ$ ), в то время как отрицательные молнии фиксировались во всех азимутальных углах, обозначенных выше. Азимут прихода положительных импульсов соответствует направлению распространения верхней области сформированного эруптивного облака, которое распространялось над

пунктом KLY рис. 2.1. Что также свидетельствует о положительном заряде этой части эруптивного облака.

На основании комплексного анализа данных были восстановлены кинематические параметры распространения эруптивного облака. Эти данные позволили оценить электростатический заряд для эруптивного облака по формуле:  $Q = V' \cdot (2\pi\epsilon_0 R_{\min}^3 / z)$ , где:  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $R_{\min} = 0$  км минимальное расстояние от регистратора до горизонтальной проекции траектории эруптивного облака,  $z = 11$  км высота распространения эруптивного облака. Заряд эруптивного облака оценен в +12.2 Кл.

Таким образом, 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 в. Шивелуч и в. Безымянный. Это позволило установить взаимосвязь зарегистрированного отклика с объемными электростатическими зарядами в эруптивном облаке. Результаты показали, 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 этой 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 этом такая конфигурация объемного заряда формируется уже в ближней зоне от кратера вулкана за счет процессов эоловой дифференциации и седиментации продуктов извержения в гравитационном поле. Логично, что конфигурация эруптивного облака согласно модели "P/N/P" при дальнейшем его распространении эволюционирует и трансформируется в более простые объемные заряды, эоловой и гравитационной седиментации продуктов извержения в атмосфере.

### **3.3. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы от эруптивных облаков эксплозивных извержений в. Эбеко, о. Парамушир**

Вулкан Эбеко является одним из наиболее активных вулканов Курильской островной дуги. Извержение этого вулкана может продолжаться до 4-5 лет и характеризуется эксплозивными событиями вулканского типа. В период наибольшей активности такие

эксплозии повторяются до ~10-20 событий в сутки [Фирстов и др. 2020]. При этом формируются эруптивные облака, высота которых может достигать 4-5 км н.у.м. Условия стратификации атмосферы определяют перенос масс пепла и газов на различные расстояния. Довольно часто в г. Северо-Курильск, который расположен в 7.4 км от кратера вулкана, выпадает пепел. Таким образом, в совокупности с орографической доступностью вулкан Эбеко является «удобным» объектом – природной лабораторией – для исследований вулканической активности, в том числе в целях изучения электризации эруптивных облаков [Акбашев, 2019; Фирстов и др. 2020].

В 2018 г. в г. Северо-Курильск на базе сейсмической станции SKR (рис.2.1, рис. 3.19) был установлен аппаратно-программный комплекс на базе аналогового датчика «ЭФ-4» (рис. 2.6) для мониторинга  $V'$ ЭПА [Будилов, Д.И. и др., 2019].

За активностью вулкана Эбеко в ФИЦ ЕГС РАН ведется непрерывное видеонаблюдение ([http://www.emsd.ru/video/Ebeko/img\\_1.jpg](http://www.emsd.ru/video/Ebeko/img_1.jpg)) с сейсмостанции SKR СФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 3.19). Эти данные являются достаточными для селекции откликов в вариациях  $V'$ ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков вулкана Эбеко. В некоторых случаях дополнительно используются данные акустического и спутникового мониторинга, а также данные баллонного зондирования. Данные сейсмостанции (акселерометра) в SKR не применялись, это связано с тем, что эксплозии вулкана Эбеко относительно несильные и сейсмический сигнал, сопровождающий его извержения на фоне техногенных помех города, в SKR слабо регистрируется. Оценка максимальной высоты эруптивной колонны выполнена на основании данных видеонаблюдений и параметров регистрирующей видеоаппаратуры.

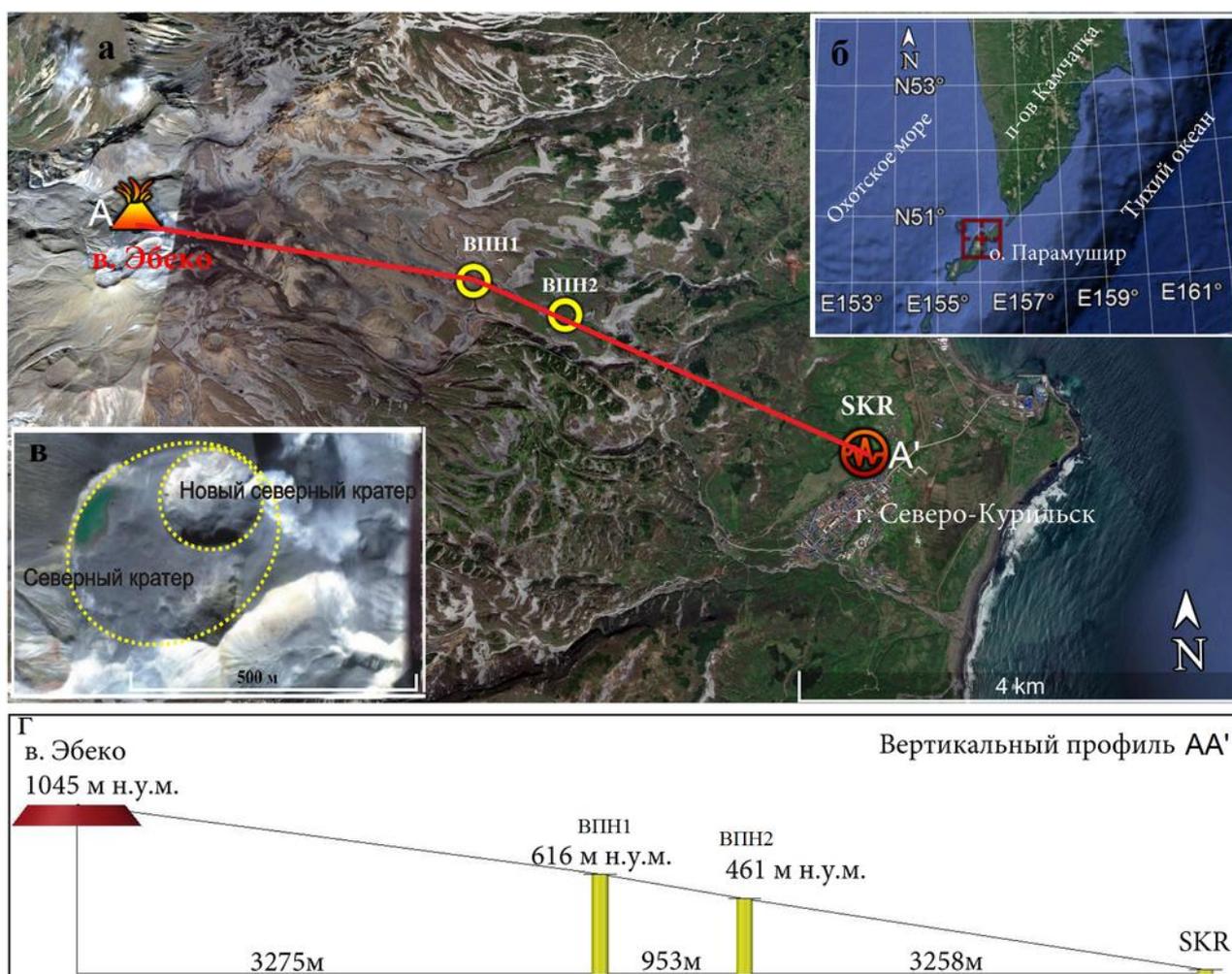


Рисунок 3.19 – Расположение пунктов наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы: а – в плане; г – по высоте; б – географическое положение вулкана Эбеко; в – кратер вулкана Эбеко

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

$$\frac{(A_{an} - A_f)}{A_f} > 1, \text{ где}$$

$(A_{an} - A_f)$  – абсолютное значение амплитуды отклика  $V'$  ЭПА;

$A_{an}$  – максимальное значение амплитуды 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. Зарегистрированные отклики  $V'$  ЭПА происходили 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, 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 таких метеорологических условиях, были исключены из анализа данных (на основании данных видеонаблюдений).

Для дальнейшего анализа электростатической структуры эруптивных облаков эксплозий вулкана Эбеко удобно ввести параметр форм-фактора эруптивного облака, который отражает характеристику эруптивного облака на момент регистрации в SKR. Очевидно, что этот параметр определяется, во-первых, мощностью отдельных эксплозий вулкана Эбеко, которая может быть различная, 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:

– тип А. Формируется при средних (2000-2500 м н.у.м) и сильных (более 2500 м н.у.м) импульсных эксплозий (градация в рамках параметров извержений вулкана Эбеко). В результате формируется эруптивная колонна с хорошо выраженными *верхней* и *нижней* областями (рис. 3.20а). При этом условия ветровой стратификации атмосферы такие, что на момент регистрации отклика  $V'$  ЭПА, взаимное расположение нижней и верхней области эруптивного облака остается близким к вертикальному, угол  $\alpha$  не более  $35^\circ$ .

– тип В. 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 области эруптивного облака значительно меняются, увеличивается расстояние между этими областями, как по вертикали, так и по горизонтали, угол  $\alpha$  более  $35^\circ$  (рис. 3.20б).

– тип С. Характерен для слабых (до 1500 м н.у.м) эксплозий. В результате формируется «распыленное» эруптивное облако, т.е. без выраженных нижней и верхней областей (рис. 3.21а).

тип D (рис. 3.21.б). Характерен для слабых длительных извержений (продувка), в результате которых формируется протяженный шлейф.

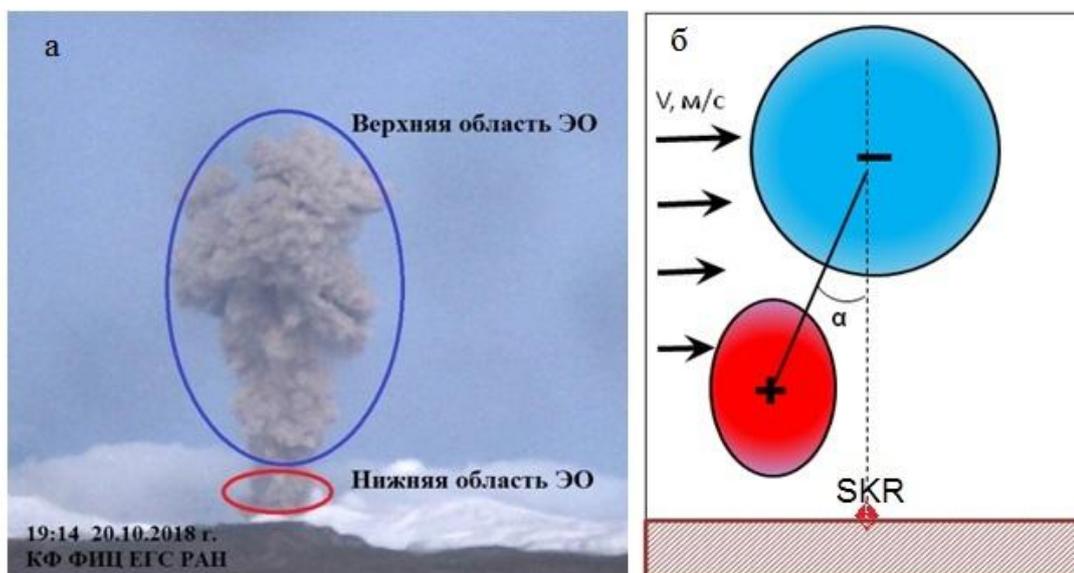


Рисунок 3.20 – а – Тип А, В форм-факторов эруптивного облака. Сформированное эруптивное облако с хорошо выраженной верхней и нижней областью; б – схематическое взаимное расположение верхней и нижней областей эруптивного облака на момент регистрации в зависимости от ветровой стратификации атмосферы, угол  $\alpha < 35^\circ$  для форм-фактора эруптивного облака типа А,  $\alpha > 35^\circ$  для форм-фактора эруптивного облака типа В

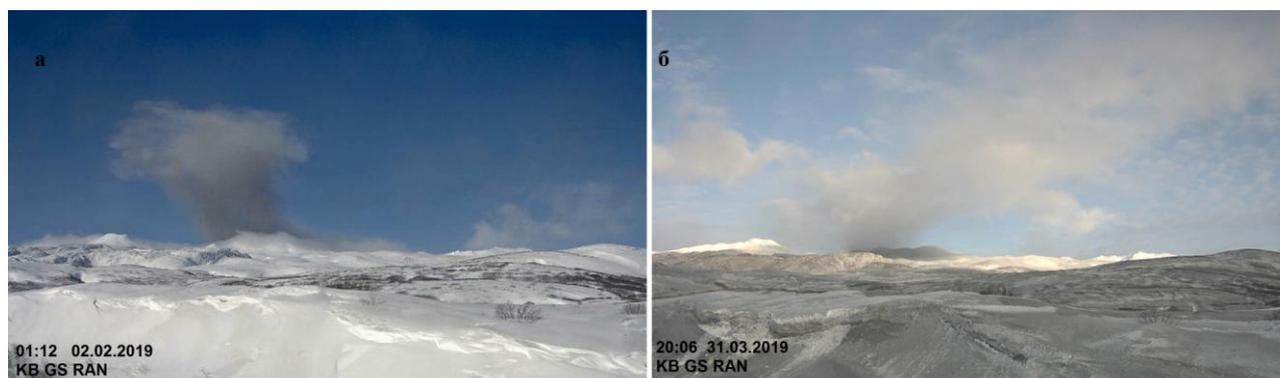


Рисунок 3.21 – а – Тип С форм-факторов эруптивного облака; б – тип D форм-факторов эруптивного облака

За период с 1 октября 2018 по 1 декабря 2020 г. в SKR в соответствии с принятым правилом выделено 179 случаев, когда распространение эруптивного облака происходило в безоблачных или малооблачных условиях и сопровождалось откликом в вариациях  $V'$  ЭПА. В таблице 3.5 представлена выборка этих откликов  $V'$  ЭПА. Подавляющее число откликов характеризуется отрицательным возмущением – 120 случаев. Это свидетельствует о том, что в эруптивном облаке эксплозий вулкана Эбеко преобладает отрицательный суммарный заряд продуктов извержения. В 36 случаях зарегистрированы положительные отклики. 15 случаев откликов имеют конфигурацию типа «N/P/N». В 9 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 случаях, когда эруптивное облако распространялось в безоблачных условиях и над SKR отклик не зарегистрирован.

Для более подробного анализа данных необходимо рассмотреть выборку данных, представленных в таблице 3.5 по дополнительному критерию – выбрать те случаи, когда эруптивное облако распространялось над SKR. Это позволит определить, во-первых, его кажущуюся скорость распространения, во-вторых, проследить взаимосвязь форм-фактора эруптивного облака и наблюдаемого отклика  $V'$  ЭПА. В таблице 3.6 показана данная выборка откликов  $V'$  ЭПА. Кажущаяся скорость распространения эруптивного облака для представленной выборки рассчитана на основании данных видеонаблюдения с SKR, по которым определялось время начала эксплозии с погрешностью  $\pm 60$  с и на основании времени вступления максимума амплитуды отклика  $V'$  ЭПА на SKR.

Таблица 3.5 – Отклики  $V'$  ЭПА, зарегистрированные от эруптивных облаков эксплозий вулкана Эбеко за период с 1 октября 2018 г. по 01 декабря 2020 г. в безоблачных и малооблачных условиях

| тип отклика $V'$ ЭПА                                 | I   | II  | III     | IV       |          | Нет сигнала |
|------------------------------------------------------|-----|-----|---------|----------|----------|-------------|
| Полярность сигнала                                   | "N" | "P" | "N/P/N" | "P/N"    | "N/P"    |             |
| Количество случаев                                   | 120 | 31  | 13      | 5        | 4        | 6           |
| Положение эруптивного облака относительно SKR        | ~   | ~   | над SKR | ~        | ~        | над SKR     |
| Скорость распространения эруптивного облака (V, м/с) | ~   | ~   | 12-25   | ~        | ~        | 8-16        |
| Форм-фактор эруптивного облака                       | ~   | ~   | тип А   | тип А, В | тип А, В | ~           |

Таблица 3.6 – Отклики в  $V'$  ЭПА, зарегистрированные при распространении эруптивных облаков от извержений вулкана Эбеко за период с 1 октября 2018 г. по 1 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"   |             |
| Количество случаев                                   | 69      | 22      | 13      | 3       | 2       | 6           |
| Положение эруптивного облака относительно SKR        | над SKR | над SKR | над SKR | над SKR | над SKR | над SKR     |
| Скорость распространения эруптивного облака (V, м/с) | 3-25    | 5-25    | 12-25   | 9-16    | 16-21   | 8-16        |
| Форм-фактор эруптивного облака                       | ~       | ~       | тип А   | тип В   | тип В   | ~           |

Рассмотрим III тип отклика. Из представленных данных (таблиц 3.5 и 3.6) видно то, что регистрация данного типа отклика возможна только при выполнении следующих условий:

1. Эруптивное облако распространяется строго над SKR или незначительно в стороне от пункта регистрации;

2. Эруптивное облако сформировано по форм-фактор типу А;
3. Эруптивное облако распространяется со скоростью  $\sim 12\text{-}25$  м/с, при этом нижняя и верхняя области эруптивного облака распространяются примерно с одинаковой скоростью.

Такие условия формирования и распространения эруптивного облака способствовали, во-первых, сохранению на момент регистрации объемной структуры нижней и верхней областей эруптивного облака, во-вторых, сохранению близко к вертикальной структуре взаимного расположения этих областей. На рис. 3.22 – 3.23 показаны примеры откликов III типа и соответствующие им этапы распространения эруптивного облака.

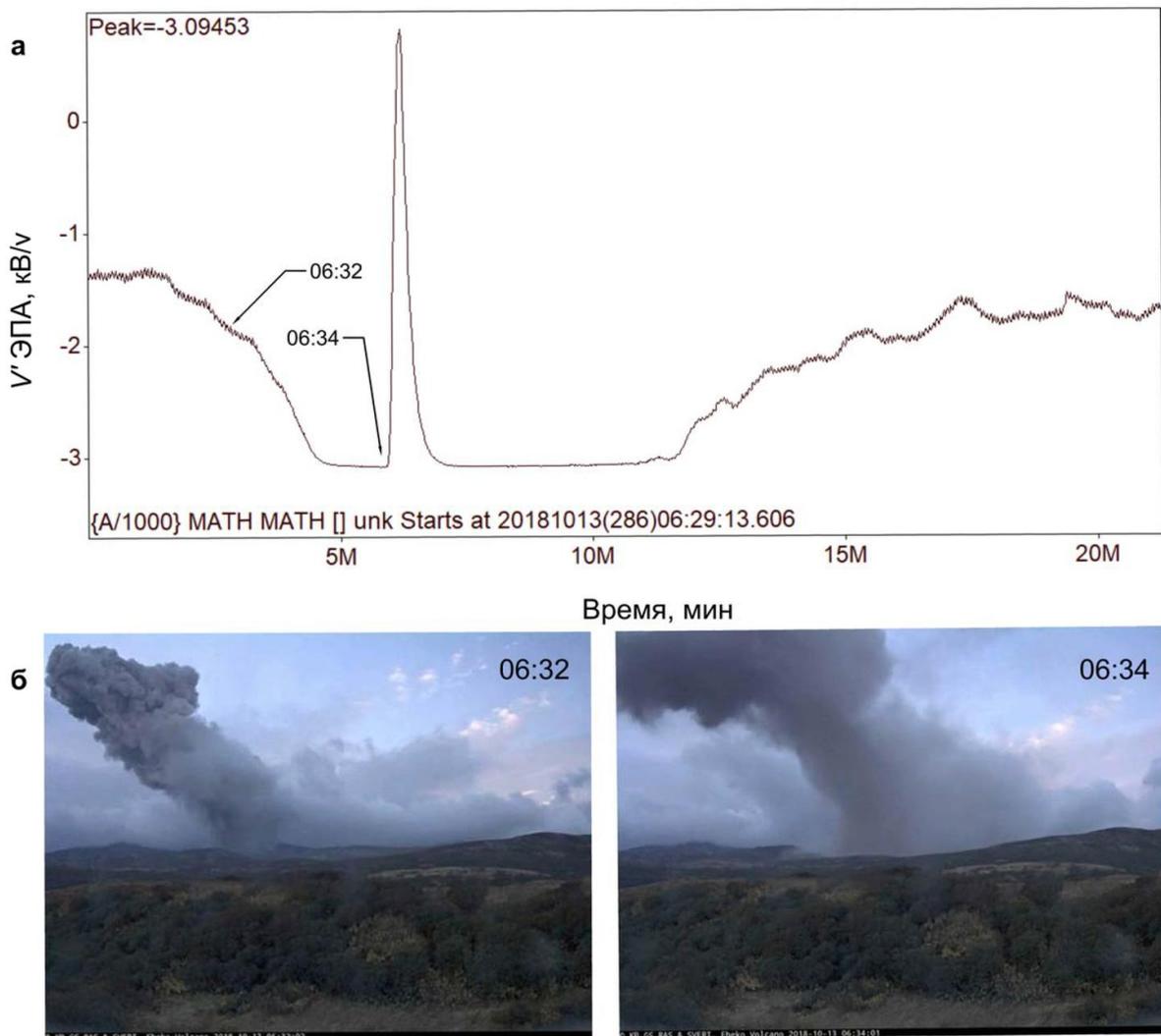


Рисунок 3.22 – а – Пример III типа отклика  $V' \text{ ЭПА}$  от эруптивного облака извержения в. Эбеко 13.10.2018 г.; б – кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака

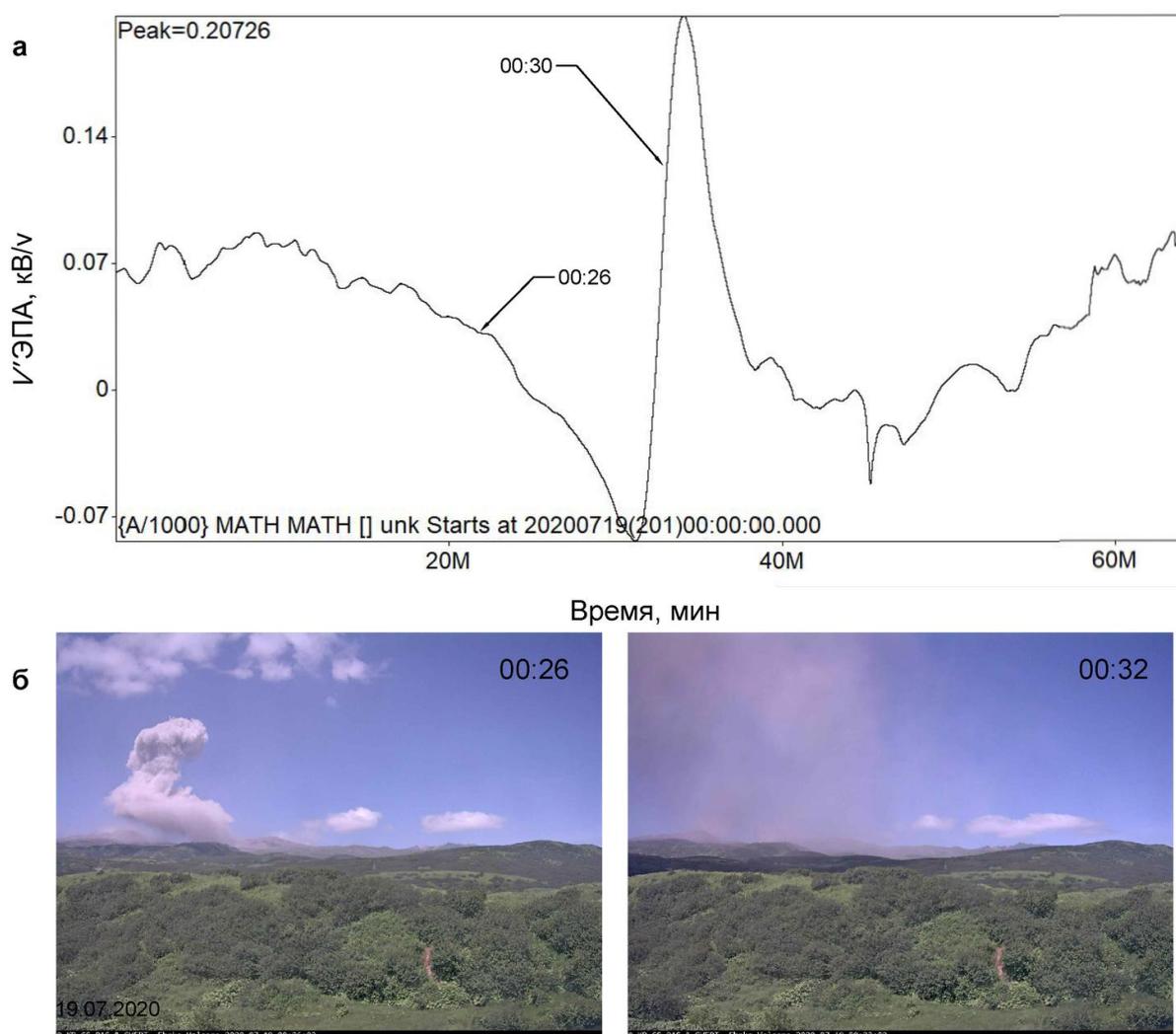


Рисунок 3.23 – а – Пример III типа отклика  $V'$ ЭПА от эруптивного облака извержения в. Эбеко 19.07.2020 г.; б – кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака

Далее рассмотрим IV тип отклика. Количество таких случаев для двух выборок различное (таблицы 3.5, 3.6). Когда эруптивное облако распространяется над пунктом регистрации, его форм-фактор относится только к типу В. При таких условиях распространения эруптивного облака зарегистрировано 5 событий (таблица 3.5). В случаях, когда эруптивное облако распространяется не строго над пунктом регистрации, его форм-фактор может относиться к типу А и В. Регистрация IV типа отклика была возможна и при форм-факторе эруптивного облака типа А, в тех случаях, когда эруптивное облако распространялось таким образом, что его нижняя область не проходила над SKR. На рис. 3.24 и 3.25 показаны примеры откликов IV типа и кадры распространения соответствующих эруптивных облаков. Конфигурация откликов IV типа может быть «PN» или «NP». Последовательность отклика продиктована условиями распространения эруптивного облака: если нижняя область эруптивного облака распространяется быстрее чем верхняя, то

регистрируется конфигурация «PN»; когда верхняя область распространяется быстрее – регистрируется обратная конфигурация отклика.

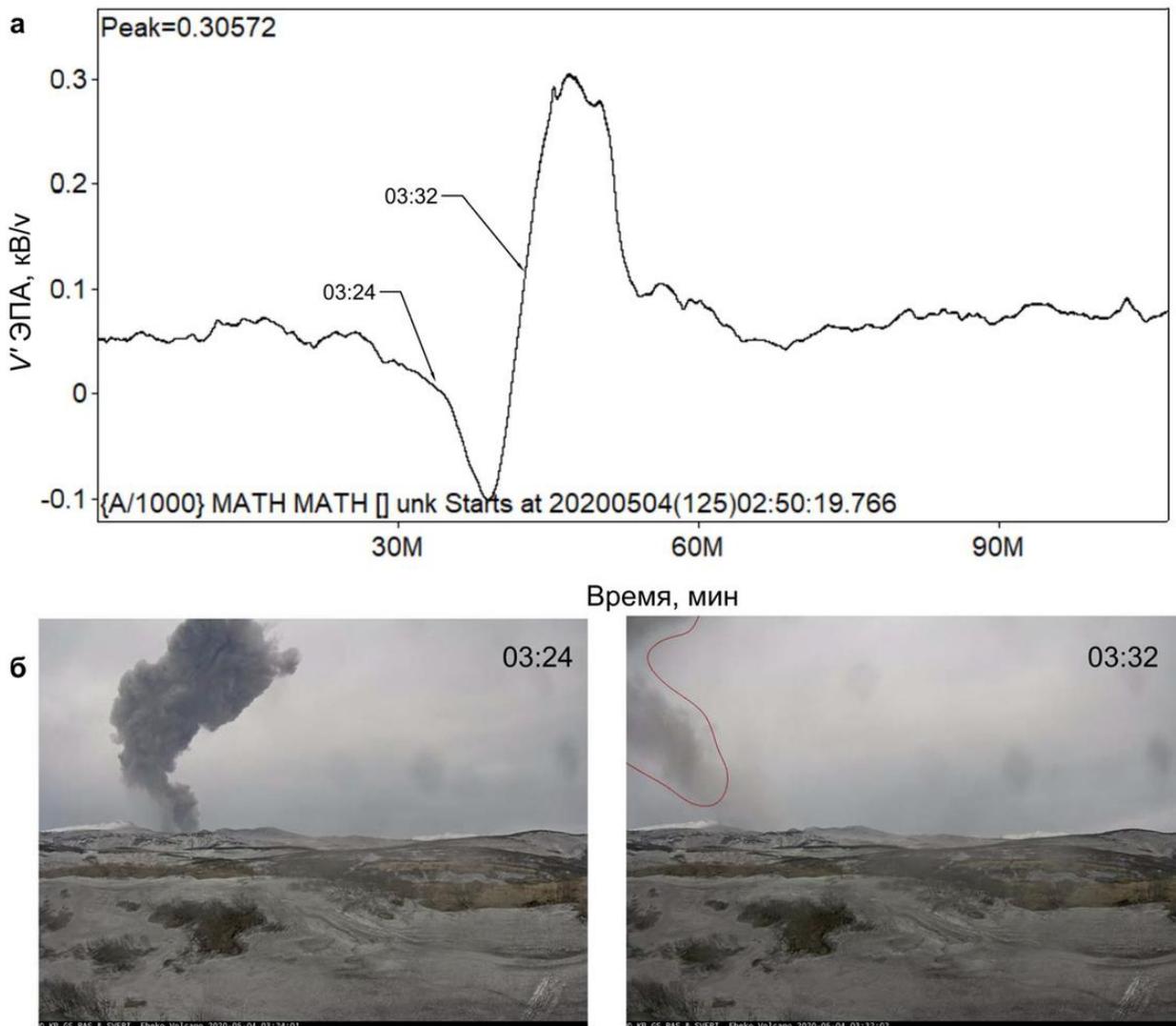


Рисунок 3.24 – а – Пример IV типа отклика  $V'$  ЭПА от эруптивного облака извержения в. Эбеко 4.05.2020 г.; б – кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака

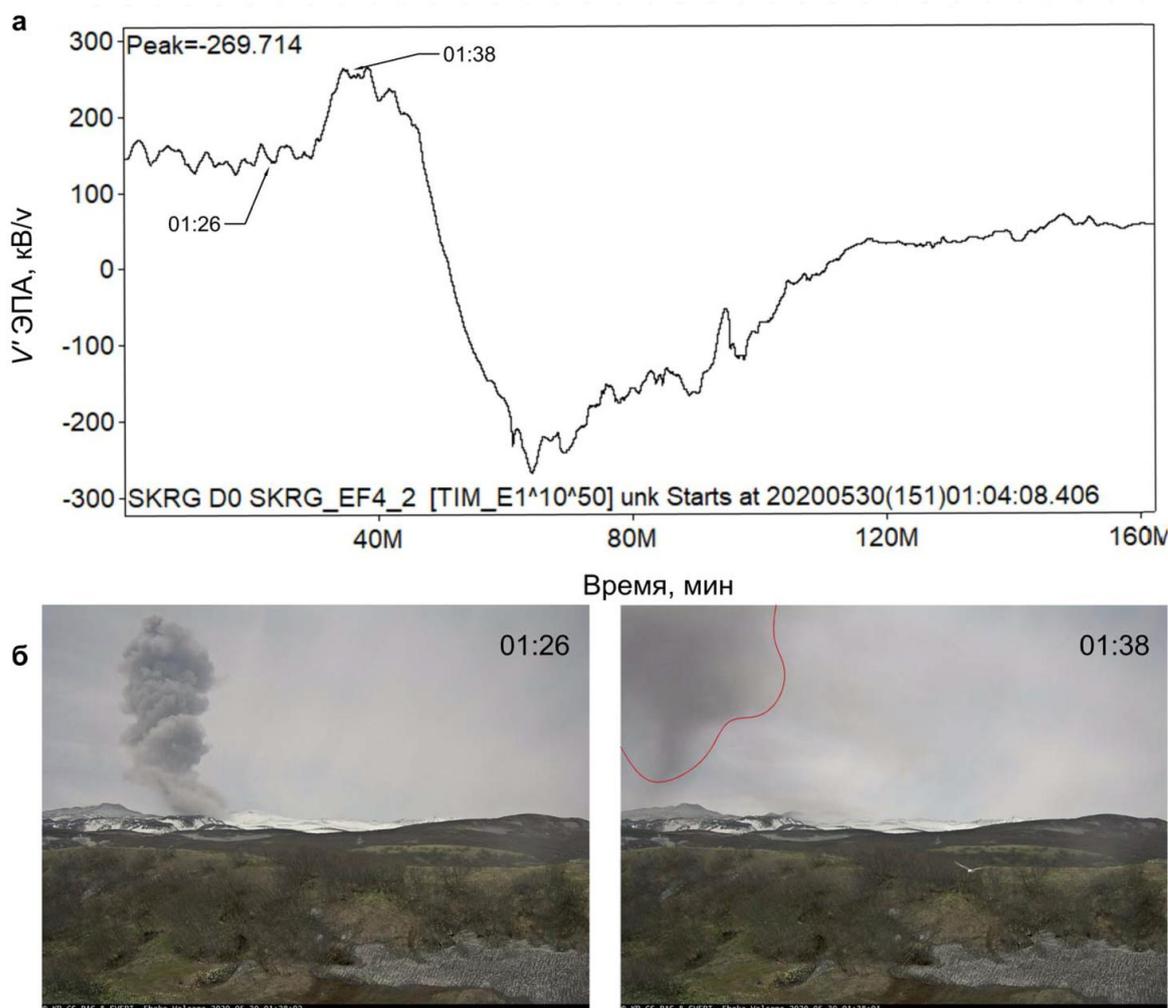


Рисунок 3.25 – а – Пример IV типа отклика  $V'$ ЭПА от эруптивного облака извержения в. Эбеко 30.05.2020 г.; б – кадры видеонаблюдения с SKR, на которых показаны этапы распространения эруптивного облака

Регистрация только положительного или только отрицательного отклика для случаев, когда эруптивное облако имело форм-фактор типа А и В, 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 С и D не установлена. При таких случаях регистрировались как отрицательные, так и положительные отклики. Здесь необходимо отметить, что для качественного анализа событий связанных с I и II типа отклика  $V'$ ЭПА связанных с форм-фактором эруптивного облака С и D, необходимы дополнительные данные о содержании газовой составляющей в эруптивном облаке, такие данные, возможно, получить при установке соответствующего оборудования в пункте регистрации. В рамках проведенных исследований, изложенных в диссертации, такие работы не проводились.

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 (рис. 3.17б). Такое распределение объемных униполярных заряженных областей в эруптивном облаке можно объяснить известной фенологической особенностью трибоэлектризации, в результате которой частицы заряжаются разными знаками в зависимости от их размера (SDBC), при этом отрицательный заряд характерен для мелких частиц, а положительный для более крупных [Lacks, 2007; Alois et al., 2017; Harrison et al., 2010; Mendez Harper et al. 2021].

Но возникает вопрос, является ли данная модель единственно возможной для формирования наблюдаемых объемных заряженных областей в эруптивном облаке эксплозий вулкана Эбеко? Исходя из набора данных, зарегистрированных на SKR, показано, что III и IV тип откликов регистрируются и при скоростях ветра более 20 м/с (таблицы 3.5 и 3.6), при этом положительный импульс имеет быстрое вступление, а его амплитуда может быть значительно выше фонового значения (рис. 3.22, 3.23). Это свидетельствует о значительном объемном положительном электростатическом заряде, который локализован в нижней области эруптивного облака (рис.3.20 б). Может ли сформироваться такой заряд только согласно модели SDBC или возможны другие механизмы генерации положительного заряда, который локализован в нижней области (рис. 3.20)? Необходимо было уточнить процессы формирования объемных зарядов в эруптивных облаках, их динамику развития. Для такого анализа и исследования одного SKR недостаточно. Поэтому на вулкане Эбеко в период с 29.07.2020 по 05.08.2020 гг. были проведены наблюдения V' ЭПА в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко.

### **3.3.1. Натурный эксперимент в ближней зоне активного кратера вулкана Эбеко**

На расстояниях ~3 и ~4 км от кратера были организованы два временных пункта наблюдения (ВПН) (рис. 3.19). На этих ВПН были установлены: электростатический флюксметр типа «ЭФ-4» с регистратором ALMEMO-2590, видеокамера (time lapse camera Brinno-100). Флюксметры располагались на штативах высотой 1 м (рис. 3.26 а, б). Общий вид аппаратуры показан на рис. 3.26. ВПН устанавливались таким образом, чтобы вместе с SKR образовывали профиль близкий к радиальному, относительно активного кратера в. Эбеко (рис. 3.19). Выбранная расстановка ВПН позволила проследить динамику изменений электростатической структуры (объемного заряда) эруптивных облаков при их распространении.



Рисунок 3.26 – а, б – Общий вид расположения ВПН1 и ВПН2 на склоне вулкана Эбеко; в – регистрирующее оборудование: 1 - регистрирующий прибор ALMEMO; 2 – электростатический флюксометр; 3 – камера видеонаблюдения

В результате наблюдений было зарегистрировано 20 откликов  $V'$ ЭПА, связанных с распространением эруптивных облаков над пунктами наблюдения или вблизи них. Отклики, зарегистрированные в ВПН<sub>1</sub> и ВПН<sub>2</sub> подобны (рис. 3.27 а,б,в), но на расстоянии 7.5 км в SKR в некоторых случаях меняется тип отклика, их длительность увеличивается, а амплитуда значительно уменьшается (уменьшается объемный заряд эруптивного облака) (рис. 3.27 а,б), и в некоторых случаях уже не регистрируется (рис. 3.27 в). На рисунке 3.27 показаны примеры зарегистрированных откликов  $V'$ ЭПА в ВПН<sub>1</sub>, ВПН<sub>2</sub>, SKR. Выделено три типа откликов (рис. 3.27), согласно принятой выше классификации, которые соответствуют:

I типу – 17 событий (71%);

III типу – 5 событий (21%);

IV типу – 2 события (8%).

Анализ данных видеонаблюдения на ВПН и на SKR в комплексе с данными баллонного зондирования позволил восстановить параметры и особенности распространения эруптивных облаков, для которых были зарегистрированы отклики  $V'$ ЭПА. Сводные кинематические параметры эруптивных облаков и динамические параметры откликов приведены в таблице 3.7.

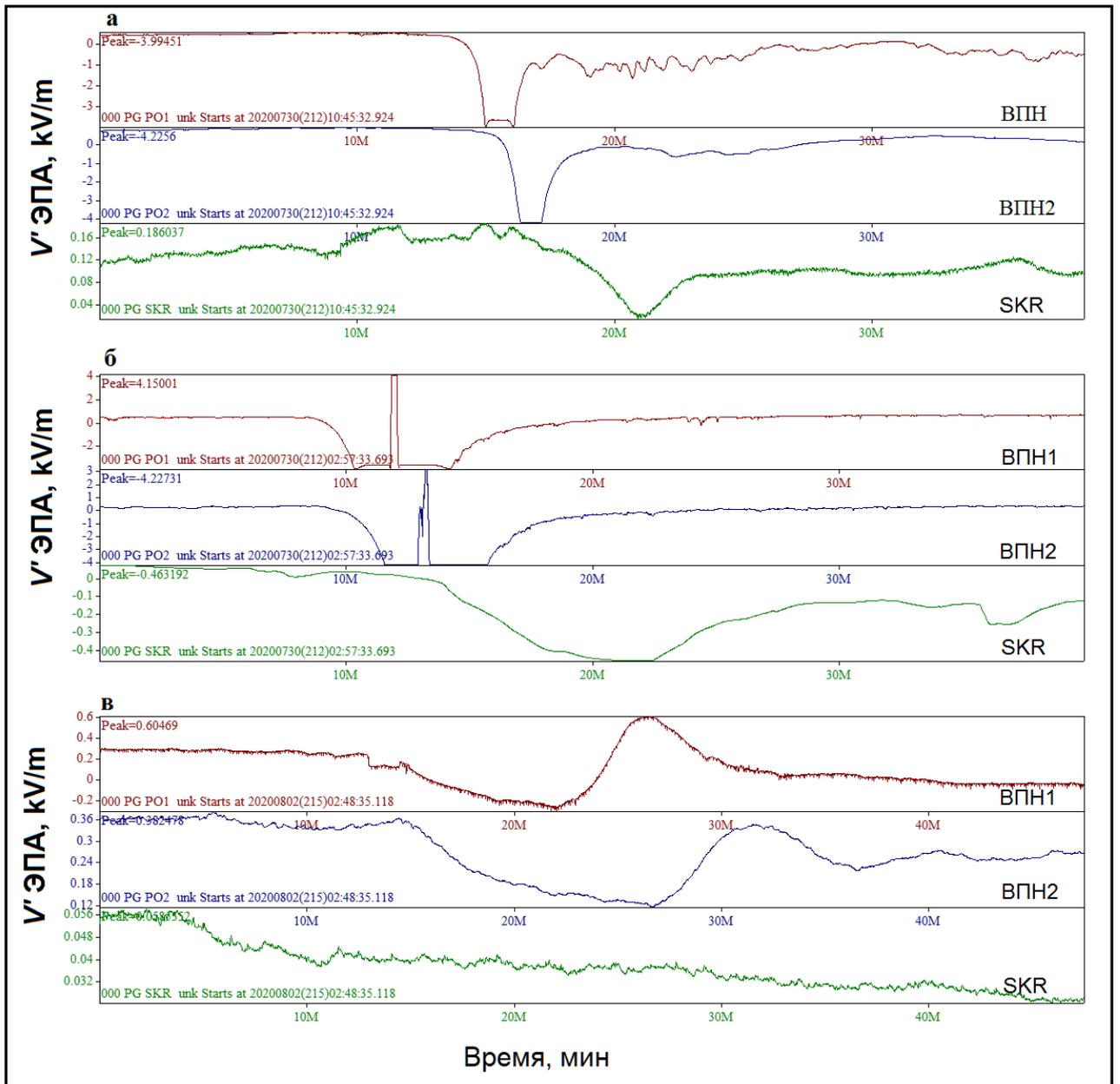


Рисунок 3.27 – Примеры зарегистрированных откликов  $V'$ ЭПА во временных пунктах наблюдения и SKR во время натурального эксперимента: а – I тип, б – III тип, в – IV тип

Таблица 3.7 – Кинематические параметры распространения эруптивного облака и динамические параметры откликов  $V'$  ЭПА

| №               | Событие        | Кинематические параметры эруптивного облака |                  |             | Динамические параметры $V'$ ЭПА |                               |                  |                               |            |                               |
|-----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|
|                 |                | $h^*$ , м                                   | $\alpha^*$ град. | $v^*$ , м/с | ВПН <sub>1</sub>                |                               | ВПН <sub>2</sub> |                               | SKR        |                               |
|                 | ддммгггг-ч:мин |                                             |                  |             | $\Delta t$                      | $V' \text{ЭПА}_{\text{extr}}$ | $\Delta t$       | $V' \text{ЭПА}_{\text{extr}}$ | $\Delta t$ | $V' \text{ЭПА}_{\text{extr}}$ |
| I тип отклика   |                |                                             |                  |             |                                 |                               |                  |                               |            |                               |
| 1               | 29072020_04:57 | 2100                                        | 290-305          | 12          | 0                               | 0.63                          | 0                | 0.45                          | 0          | 0.03                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 230                             | -2.69                         | 313              | -1.45                         | 1443       | -0.33                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 1295                            | 0.50                          | 1410             | 0.28                          | 2775       | -0.09                         |
| 2               | 29072020-07:16 | 1730                                        | 289-320          | 8-9         | 0                               | 0.78                          | 0                | 0.67                          | 0          | 0.06                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 258                             | -3.99                         | 335              | -3.23                         | 820        | -0.22                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 2407                            | 0.84                          | 2543             | 0.62                          | 3420       | 0.04                          |
| 3               | 29072020-10:53 | 1700                                        | 287-310          | 10-12       | 0                               | 0.54                          | 0                | 2.87                          | 0          | -0.08                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 167                             | -4.02                         | 223              | -4.17                         | 308        | -0.22                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 1309                            | 0.42                          | 1494             | 0.17                          | 2020       | 0.10                          |
| 4               | 29072020-12:24 | -                                           | 295-315          | 10-12       | 0                               | 0.40                          | 0                | 0.42                          | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 223                             | -1.41                         | 292              | -0.55                         | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 717                             | 0.44                          | 775              | 0.50                          | -          | -                             |
| 5               | 29072020-13:07 | -                                           | 295-315          | 10          | 0                               | 0.46                          | 0                | 0.51                          | 0          | 0.08                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 359                             | -3.91                         | 433              | -4.18                         | 986        | 0.00                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 1658                            | 0.29                          | 1836             | 0.21                          | 2782       | 0.02                          |
| 6               | 29072020-15:12 | -                                           | 295-315          | 10          | 0                               | 0.42                          | 0                | 0.38                          | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 173                             | -3.70                         | 252              | -4.20                         | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 335                             | 0.31                          | 510              | 0.12                          | -          | -                             |
| 7               | 29072020-23:48 | 1450                                        | 283              | 12          | 0                               | 0.76                          | 0                | 0.76                          | 0          | 0.11                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 201                             | -3.89                         | 310              | -1.60                         | 622        | 0.10                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 690                             | 0.59                          | 779              | 0.59                          | 1019       | 0.13                          |
| 8               | 30072020-07:02 | 1750                                        | 287              | 15          | 0.00                            | 0.86                          | 0.00             | 0.81                          | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 149                             | -3.03                         | 211              | -1.21                         | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 534                             | 0.40                          | 598              | 0.19                          | -          | -                             |
| 9               | 30072020-09:21 | -                                           | 287              | 14          | 0.00                            | 0.73                          | 0.00             | 0.68                          | 0.00       | 0.11                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 274                             | -0.91                         | 343              | -0.11                         | 1110       | 0.06                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 1686                            | 0.66                          | 1800             | 0.78                          | 2608       | 0.13                          |
| 10              | 30072020-10:56 | -                                           | 287              | 13          | 0.00                            | 0.50                          | 0.00             | 0.89                          | 0.00       | 0.17                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 276                             | -3.66                         | 349              | -4.20                         | 610        | 0.02                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 1190                            | 0.10                          | 1309             | 0.44                          | 1477       | 0.12                          |
| 11              | 30072020-13:42 | -                                           | 280              | 14          | 0.00                            | 0.00                          | 0.00             | -0.09                         | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 159                             | -2.02                         | 288              | -2.58                         | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 437                             | 0.03                          | 506              | 0.07                          | -          | -                             |
| 12              | 30072020-21:08 | 2300                                        | 289              | 18-20       | 0.00                            | 0.62                          | 0.00             | 0.24                          | 0.00       | 0.03                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 462                             | -3.93                         | 528              | -4.22                         | 738        | -0.05                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 2488                            | 0.24                          | 2545             | 0.22                          | 2727       | 0.02                          |
| 13              | 31072020-03:24 | 1800                                        | 294              | 13          | 0.00                            | 0.43                          | 0.00             | 0.54                          | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 275                             | -1.03                         | 325              | 0.60                          | -          | -                             |
|                 |                |                                             |                  |             | 634                             | 0.36                          | 808              | 0.37                          | -          | -                             |
| III тип отклика |                |                                             |                  |             |                                 |                               |                  |                               |            |                               |
| 14              | 29072020_16:35 | 2100                                        | 294-280          | 13          | 0                               | 0.47                          | 0                | 0.40                          | 0          | -0.01                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 180                             | -3.97                         | 263              | -4.21                         | 732.00     | -0.05                         |
|                 |                |                                             |                  |             | 228                             | 4.05                          | 312              | 3.13                          | 1123.00    | 0.06                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 294                             | -3.67                         | 294              | -4.17                         |            |                               |
|                 |                |                                             |                  |             | 808                             | 0.40                          | 808              | 0.25                          |            |                               |
| 15              | 29072020_19:30 | 2000                                        | 290-300          | 11          | 0                               | 0.48                          | 0                | 0.29                          | 0          | 0.01                          |
|                 |                |                                             |                  |             | 230                             | -3.90                         | 312              | -4.19                         |            |                               |

| №              | Событие        | Кинематические параметры<br>эруптивного облака |             |            | Динамические параметры $V'$ ЭПА |            |                          |            |                          |       |
|----------------|----------------|------------------------------------------------|-------------|------------|---------------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|-------|
|                |                |                                                |             |            | ВПН <sub>1</sub>                |            | ВПН <sub>2</sub>         |            | SKR                      |       |
| ддммгггг-ч:мин | $h^*$ , м      | $\alpha^*$ град.                               | $v^*$ , м/с | $\Delta t$ | $V'$ ЭПА <sub>extr</sub>        | $\Delta t$ | $V'$ ЭПА <sub>extr</sub> | $\Delta t$ | $V'$ ЭПА <sub>extr</sub> |       |
|                |                |                                                |             |            | 286                             | 3.97       | 355                      | 3.15       | 987.00                   | -0.46 |
|                |                |                                                |             |            | 410                             | -3.67      | 712                      | -4.19      | 3510.00                  | 0.04  |
|                |                |                                                |             |            | 2097                            | 0.39       | 2252                     | 0.23       |                          |       |
| 16             | 30072020_03:08 | 2176                                           | 297-273     | 11         | 0                               | 0.42       | 0                        | 0.29       | 0                        | 0.01  |
|                |                |                                                |             |            | 151                             | -3.67      | 312                      | -4.19      | 787.00                   | -0.46 |
|                |                |                                                |             |            | 211                             | 4.07       | 286                      | 3.15       | 3061.00                  | 0.04  |
|                |                |                                                |             |            | 278                             | -3.66      | 367                      | -4.19      |                          |       |
|                |                |                                                |             |            | 1137                            | 0.50       | 1482                     | 0.23       |                          |       |
| 17             | 30072020_11:57 | -                                              | 290         | 6          | 0                               | 0.30       | 0                        | 0.54       | 0.00                     | 0.03  |
|                |                |                                                |             |            | 175                             | -3.59      | 250                      | -1.74      | 492.00                   | 0.01  |
|                |                |                                                |             |            | 230                             | 4.06       | 318                      | 3.14       | 666.00                   | 0.07  |
|                |                |                                                |             |            | 339                             | -3.65      | 433                      | -4.19      | 1662.00                  | 0.02  |
|                |                |                                                |             |            | 1344                            | 0.34       | 1492                     | 0.19       |                          |       |
| 18             | 30072020_23:39 | -                                              | 310         | 8          | 0                               | 0.30       | 0                        | 0.32       | 0                        | 0.01  |
|                |                |                                                |             |            | 262                             | 3.73       | 358                      | -2.86      | 660.00                   | 0.00  |
|                |                |                                                |             |            | 330                             | 0.56       | 791                      | 0.02       | 931.00                   | 0.01  |
|                |                |                                                |             |            | 392                             | -3.83      | -                        | -          |                          |       |
|                |                |                                                |             |            | 1076                            | -0.16      | -                        | -          |                          |       |
| IV тип отклика |                |                                                |             |            |                                 |            |                          |            |                          |       |
| 19             | 02082020_03:04 | 2500                                           | 282         | 5          | 0                               | 0.13       | 0                        | 0.00       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 489                             | -0.26      | 767                      | 0.11       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 752                             | 0.60       | 1065                     | 0.35       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 1328                            | 0.05       | 1605                     | 0.27       | -                        | -     |
| 20             | 02082020_06:10 | 1900                                           | 280         | 5          | 0                               | 0.16       | 0                        | 0.27       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 709                             | -0.02      | 881                      | 0.19       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 1188                            | 0.62       | 1767                     | 0.34       | -                        | -     |
|                |                |                                                |             |            | 2080                            | 0.06       | 3641                     | 0.23       | -                        | -     |

\*Примечания к таблице:  $h$  – высота подъема эруптивного облака;  $\alpha$  – азимут распространения эруптивного облака;  $v$  – скорость распространения эруптивного облака;  $\Delta t$  (с) – интервал времени от момента начала извержения;  $V'$  ЭПА (кВ/м) – значение для соответствующего  $\Delta t$  (фоновые значения до и после отклика и максимальные значения динамики отклика  $V'$  ЭПА).

Рассмотрим связь особенностей распространения эруптивного облака с типом отклика  $V'$  ЭПА. Для откликов I типа характерно то, что облако распространялось в стороне от пункта регистрации (рис. 3.28а). Важно отметить, что в некоторых случаях эруптивное облако было компактным и распространялось высоко над временными пунктами регистрации  $V'$  ЭПА. Скорости распространения эруптивного облака для этого типа возмущений были в диапазоне 8-10 м/с. Такой тип отклика свидетельствует о том, что на стадии плавучести в эруптивном облаке преобладает суммарный отрицательный объемный заряд. Для некоторых событий значения  $V'$  ЭПА превышают динамический диапазон регистрирующей аппаратуры  $> \pm 4$  кВ/м (таблица 3.7).

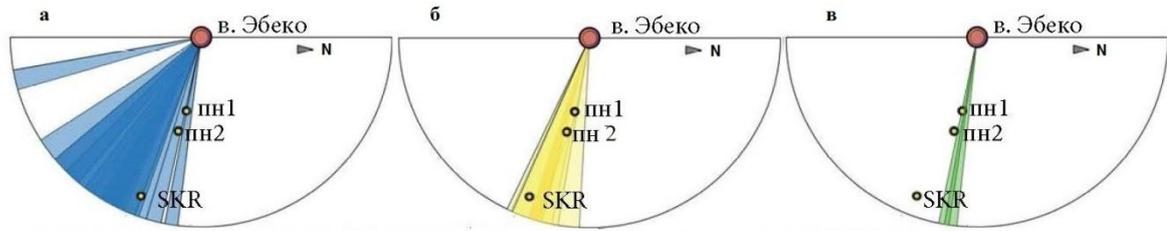


Рисунок 3.28 – Секторы распространения эруптивного облака эксплозий вулкана Эбеко относительно пунктов наблюдения, для которых зарегистрированы отклики в  $V'$  ЭПА: а – I тип отклика; б – III тип отклика; в – IV тип отклика

Отклики III типа зарегистрированы при прохождении эруптивного облака непосредственно над пунктом регистрации со скоростью 8-13 м/с, иногда до 17 м/с, при этом его нижняя область распространялась по склону вулкана и в местах установки ВПН<sub>1</sub> и ВПН<sub>2</sub> (рис. 3.29). К сожалению, при этом значения  $V'$  ЭПА превышали динамический диапазон регистрирующей аппаратуры. Следует отметить, что в практике исследований электризации эруптивных облаков с регистрацией III типа отклик  $V'$  ЭПА – с резким положительным импульсом, который превышает фоновое значение в сигнале с отрицательной полярностью, в литературе не описан.

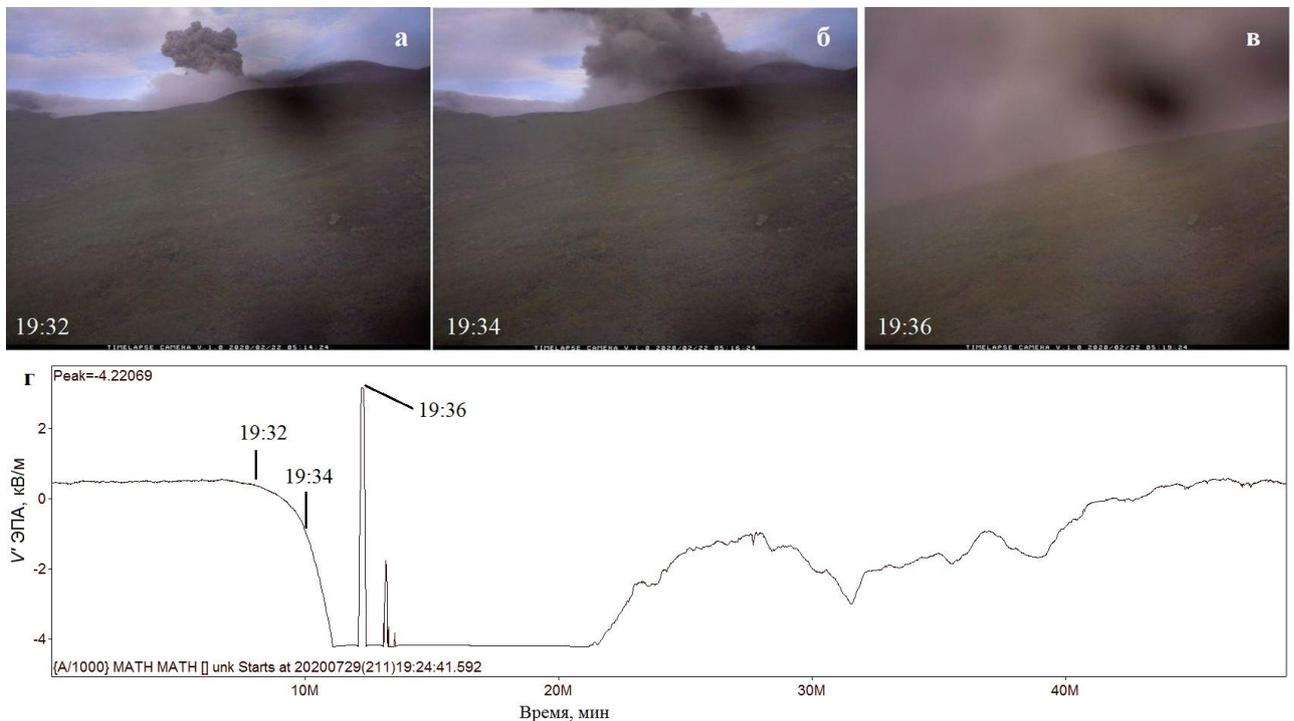


Рисунок 3.29 – Кадры видеосъемки в ВПН<sub>2</sub>: а – начало эксплозии в 19:32 29.07.2020; б – момент распространения нижней области эруптивного облака в ВПН<sub>1</sub>; в – момент распространения нижней области эруптивного облака в ВПН<sub>2</sub>; г – запись отклика  $V'$  ЭПА в ВПН<sub>2</sub> при распространении эруптивного облака

Отклики IV типа регистрировались в условиях хорошей погоды (минимальная облачность, скорость ветра не более 7 м/с, см. таблицу 3.7). В таких условиях распространения нижняя область эруптивного облака длительное время контактировала с поверхностью склона вулкана. При дальнейшем распространении нижняя область эруптивного облака постепенно отрывалась от поверхности склона, и, соответственно, в зоне расположения ВПН<sub>1</sub> и ВПН<sub>2</sub> уже находилась на значительной высоте относительно поверхности вулкана (~ 1000 м н.у.м.). При этом в ВПН<sub>1</sub> пепел не выпадал (визуальные наблюдения, фото и видео регистрация автора) (рис. 3.30). Для таких условий распространения эруптивного облака значения  $V''$ ЭПА значительно ниже, чем при некоторых случаях I типа отклика и для всех случаев III типа откликов.

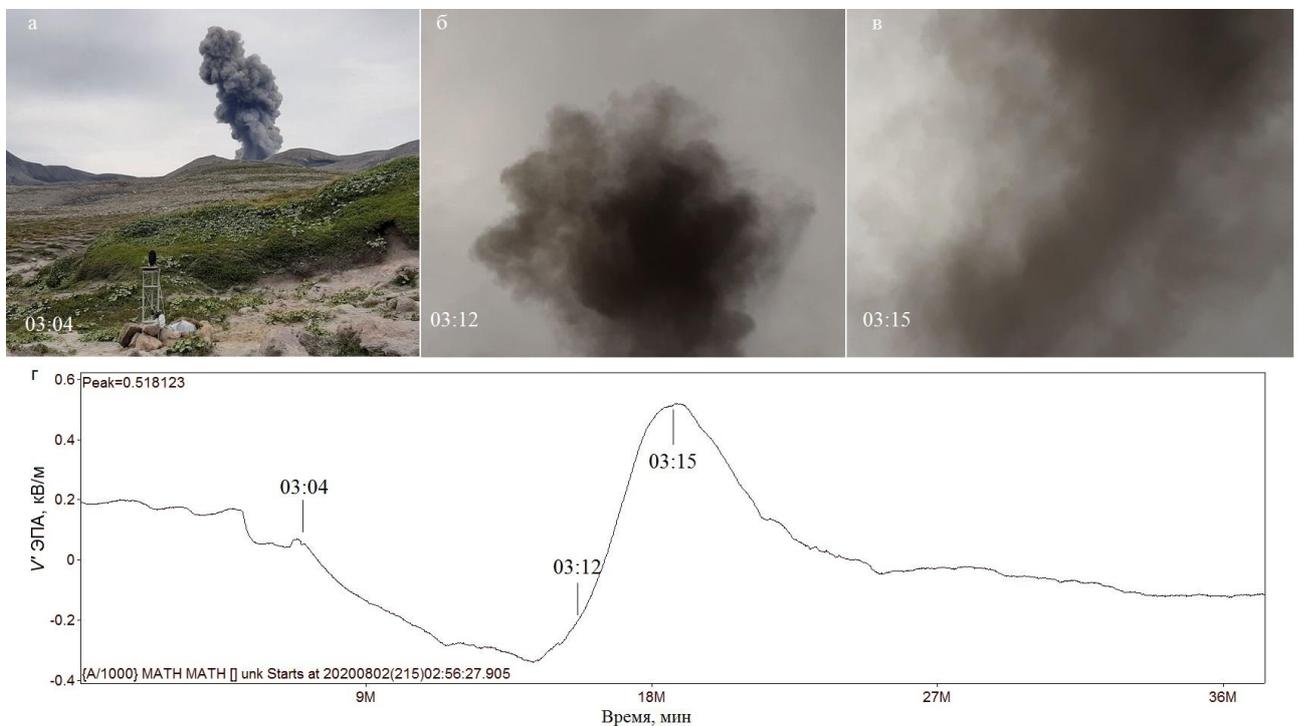


Рисунок 3.30 – Кадры фото-видео съемки в ВПН<sub>1</sub> автор Акбашев Р.Р.: а – начало эксплозии в 15:04 02.08.2020; б – момент распространения верхней области эруптивного облака над ВПН<sub>1</sub> (фото-видео фиксация снизу-вверх); г – момент распространения нижней области эруптивного облака над ВПН<sub>1</sub> (в); запись отклика  $V''$ ЭПА в ВПН<sub>1</sub> при распространении эруптивного облака

В результате наблюдений в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко зарегистрированы три типа отклика  $V''$ ЭПА от эруптивных облаков. Показано, что отрицательный заряд является преобладающим в эруптивных облаках эксплозий вулкана Эбеко. III тип откликов зарегистрирован при условии, когда нижняя область эруптивного облака распространялась у поверхности склона вулкана в местах установки ВПН<sub>1</sub> и ВПН<sub>2</sub>, при этом положительный импульс в отрицательной области сигнала характеризуется быстрым вступлением и

амплитудой выше фона (рис. 3.29), которая ограничена динамическим диапазоном аппаратуры. Такие параметры сигнала могут свидетельствовать о сформированной структуре положительного объемного заряда, который занимает меньший объем по отношению к основному эруптивному облаку и который локализован в его нижней области (рис. 3.20). Для этого типа сигнала зарегистрировано 5 событий, что свидетельствует о том, что положительный объемный заряд сформирован уже в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко. Важно отметить, что III тип сигнала формируется в нижней области эруптивного облака и регистрируется тогда, когда эта область распространяется у самой поверхности склона вулкана. Склон вулкана (поверхность Земли) с точки зрения удельной электропроводности — это идеальный проводник по отношению к атмосфере. Поэтому возникает вопрос, может ли влиять поверхность склона вулкана на электростатическую структуру эруптивного облака, при условии, что нижняя область эруптивного облака имеет физическое взаимодействие с поверхностью при его распространении, что отражено на рис.3.29 б,в.

Далее рассмотрим более подробно с какими физическими процессами может быть связана выдвинутая физическая гипотеза формирования положительного объемного заряда в нижней области эруптивного облака при его боковом сносе.

Во время импульсных фреатомагматических извержений вулкана Эбеко на стадии, когда эруптивная колонна достигает максимальной высоты подъема, его основной заряд сконцентрирован в верхней области, которая наиболее нагружена пеплом, на фото на рис. 3.30б и 3.30в визуальное хорошо выделяется разница в насыщенности пеплом в этих областях, на рис. 3.26а,б также можно визуальное наблюдать, что большее количество вулканического материала сконцентрировано в верхней области эруптивного облака.

Для случая № 19 (таблица 3.7) были рассчитаны объемные заряды верхней и нижней области эруптивного облака, которое распространялось над ВПН<sub>1</sub> со скоростью 5-7 м/с в условиях хорошей погоды. Расчетное значение заряда в верхней области составило 0.05 Кл, а в нижней 0.015 Кл.

Наибольшее значение напряженности электрического поля в верхней области эруптивного облака, которое логично представлено более мелкими частицами пеплов, согласуется с результатами экспериментальных работ Руленко О.П. (1986), где показано, что с уменьшением медианного диаметра частиц при одной и той же массе пепла, интенсивность электризации облаков возрастает.

По проведенным оценкам, для исследуемых случаев, максимальное значение заряда эруптивного облака на момент его максимального подъема соответствуют 3-5 Кл. Таким образом, верхняя область, распространяясь на высотах не более 2500 м н.у.м. (таблица 3.7), генерирует значительную напряженность электрического поля, которое наводит на

поверхность склона вулкана противоположный электростатический заряд (эффект электростатической индукции). В этой области возникает поле  $E_z$  (рис. 3.31а).

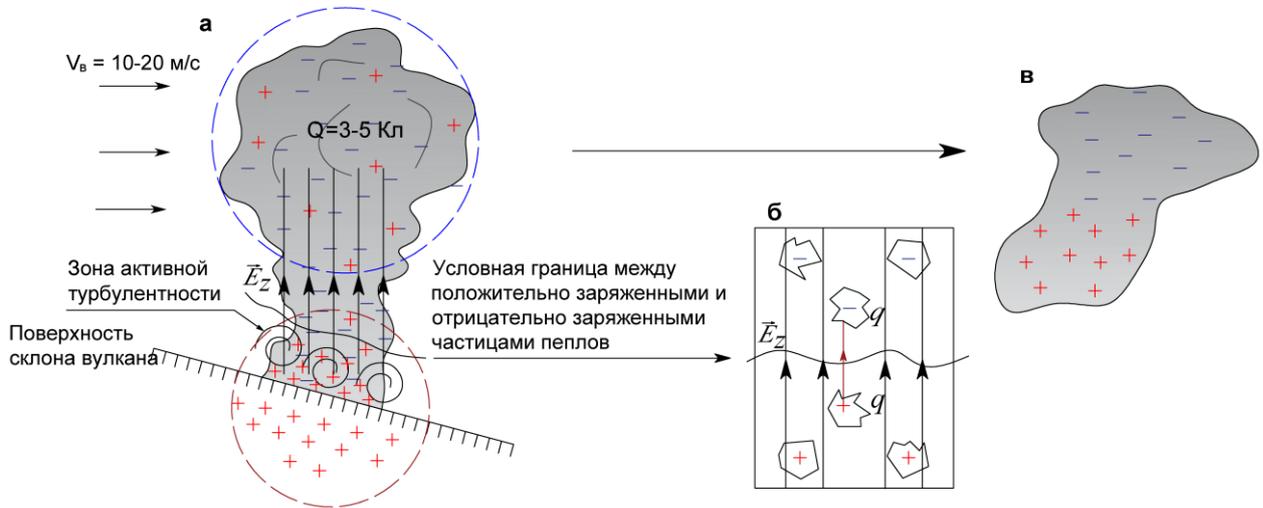


Рисунок 3.31 – Физическая гипотеза формирования объемного положительного заряда в нижней области эруптивного облака: а – стадия плавучести эруптивного облака;  $V_b = 10-20 \text{ м/с}$  – скорость ветра;  $Q = 3-5 \text{ Кл}$  – электростатический заряд эруптивного облака на начальной стадии плавучести;  $E_z$  – вектор напряженности электрического поля, который задан основным зарядом эруптивного облака и наведенным зарядом на поверхности склона вулкана; в зоне активной турбулентности происходит контактная перезарядка частиц пеплов от поверхности; б – условная граница вблизи поверхности между отрицательно и положительно заряженной областью эруптивного облака;  $q$  – собственный заряд частиц пепла; в этой области частицы подвержены процессам столкновения под действием кулоновских сил; в – сформированная дипольная структура эруптивного облака, на момент, когда оно оторвано от поверхности склона вулкана

При распространении эруптивного облака вблизи поверхности склона вулкана для скоростей ветра более  $8-10 \text{ м/с}$ , создаются благоприятные условия для возникновения динамической турбулентности. Турбулентный поток в приземном слое подхватывает частицы пеплов, что продлевает их нахождение во взвешенном состоянии, а также способствует сталкиванию частиц пеплов друг с другом и с поверхностью. В результате в зоне турбулентности, за счет контактной электризации возникает слой положительно заряженной области. Вблизи поверхности склона вулкана формируется условная «электростатическая граница» между положительным объемным зарядом сформированном в эруптивном облаке у поверхности земли и расположенном выше отрицательным объемным зарядом (рис. 3.31а). На такой условной электростатической границе локализованы отрицательно и положительно заряженные частицы (рис. 3.31а, 3.31б). Противоположно и одноименно заряженные частицы пеплов взаимно подвержены влиянию кулоновских сил, причем как от собственных зарядов  $q$ , так и от электрического поля  $E_z$  (рис. 3.31б).

Кулоновские силы способствуют сталкиванию частиц, что убедительно показано в теоретической работе [Pollastri, 2021]. Однако в этой работе учтены только кулоновские силы от собственных зарядов частиц. В предложенной физической гипотезе показано, что помимо собственных зарядов, на частицы должно оказывать влияние электростатическое поле  $E_z$ , которое имеет строгое направление (рис.3.31 а, б). Поэтому вклад кулоновских сил в эффективность столкновений частиц пеплов по предложенной гипотезе будет выше. Такое контактное взаимодействие способствует процессу перераспределения зарядов. В течение времени увеличивается количество положительно заряженных частиц – формируется объемный заряд в нижней области эруптивного облака. Этот процесс, по всей видимости, может протекать до того момента, когда объемный заряд в нижней области сравняется с объемным зарядом верхней области эруптивного облака, или когда нижняя область оторвется от поверхности склона вулкана (рис. 3.31в).

Для подтверждения выдвинутой физической гипотезы формирования объемного положительного заряда в нижней области эруптивного облака автором был проведен физический эксперимент по моделированию пепловых облаков с одновременной регистрацией  $V'$ ЭПА, результаты этих исследований подробно представлены в разделе 4 диссертации.

### **Выводы к главе 3**

Физика взрывного процесса может быть понята и изучена на базе наблюдений комплексом геофизических методов. Изучение электризации эруптивных облаков взрывных извержений существенно расширяет знания о физико-химических процессах, сопровождающих образование и распространение эруптивного облака.

Организованная автором сеть пунктов наблюдения  $V'$ ЭПА вблизи северной группы вулканов позволила зарегистрировать отклики в вариациях  $V'$ ЭПА, связанные с распространением эруптивных облаков, которые образовались в результате взрывных извержений вулкана Шивелуч и вулкана Безымянный.

Информативность этого метода в значительной степени определяется двумя факторами: условиями хорошей погоды, так как этот метод чувствителен к вариациям метеорологических условий, и условиями ветровой стратификации по высоте, т.к. регистрация откликов возможна в относительно узком секторе распространения эруптивного облака относительно пункта регистрации. Исходя из этих ограничений, даже получение единичных наблюдений за откликом  $V'$ ЭПА при распространении эруптивного облака представляет большой интерес.

Данные сети пунктов регистрации  $V'$  ЭПА позволяют существенно дополнять картину переноса эруптивного облака с малой концентрацией аэрозоля, недоступных наблюдению со спутников, также позволяют произвести оценки траектории движения эруптивного облака и получать некоторые оценки размеров вулканического аэрозоля и его динамики в процессе эволюции и переноса эруптивного облака.

Следует особо отметить то, что регистрация  $V'$  ЭПА выполняется дистанционно, что в отношении безопасности является положительным фактором при изучении таких вулканов как Шивелуч, Безымянный, на которых возможны мощные катастрофические извержения типа направленный взрыв.

Метод регистрации электрических процессов в эруптивном облаке может быть, одним из составляющих в комплексных наблюдениях за вулканическими извержениями с целью оценки пепловой опасности для авиатранспорта.

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 области эруптивного облака в атмосфере от извержений в. Шивелуч и в. Безымянный. Это позволило установить взаимосвязь зарегистрированного отклика с объемными электростатическими 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 области переносится аэрозолем и газом. При этом такая конфигурация объемного заряда формируется уже в ближней зоне от кратера вулкана за счет процессов эоловой дифференциации и седиментации продуктов извержения в гравитационном поле. 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.

Важным и эффективным этапом в исследованиях стала установка комплекта аппаратуры в г. Северо-Курильск. В 7.2 км западнее от города расположен один из активнейших вулканов Курильской островной дуги. Вулкан Эбеко — это природная лаборатория для исследований электризации эруптивных облаков. В период с 2018 по 2020 гг. было выделено 179 случаев, когда был зарегистрирован отклик в вариациях  $V'$  ЭПА,

связанных с распространением эруптивного облака. Выделено четыре типа характерных откликов в вариациях *V'* ЭПА:

I тип – отрицательные возмущения (120);

II тип – положительные возмущения (31);

III тип – отрицательное возмущение, в области которого регистрируется положительный импульс (13);

IV тип – дипольные вариации (5).

В период с 29.07.2020 по 05.08.2020 гг. был выполнен комплекс наблюдений в ближней зоне от кратера вулкана Эбеко. Было установлено два временных пункта наблюдения. В результате этих наблюдений были зарегистрировано 20 откликов. Выделено три характерных типа откликов:

I типу – 17 событий или (71%);

III типу – 5 событий (21%);

IV типу – 2 события (8%).

По результатам наблюдений было выделено четыре типа отклика в вариациях *V'* ЭПА. На основе комплексного анализа зарегистрированных откликов и условий распространения показано, что в эруптивном облаке взрывов вулкана Эбеко на стадии его формирования преобладает отрицательный объемный заряд. Эти выводы согласуются с аналогичными результатами на вулкане Сакураджима (Япония) (Miura, 2002).

Комплексный анализ зарегистрированных данных позволил определить связь выделенных типов сигналов (III и IV) с типом форм-фактора эруптивного облака на момент, когда облако находится в зоне регистрации SKR. Показано, что для форм-факторов типа А и В в нижней области эруптивного облака на момент регистрации сформирован объемный положительный заряд. Поэтому регистрация III или IV типа отклика связана с взаимным пространственным расположением нижней и верхней областей эруптивного облака на момент его распространения над пунктом регистрации, т.е. определяется ветровой стратификацией. При этом важно отметить, что скорость распространения эруптивного облака для III и IV типов была более 10 м/с.

Главным результатом наблюдения в ближней зоне вулкана была регистрация III типа отклика. Это свидетельствовало о том, что объемный положительный заряд в нижней области эруптивного облака сформирован уже в первые минуты его распространения.

На основании этих наблюдений предложена новая физическая гипотеза формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака, где ключевую роль играют два основных момента: во-первых, в эруптивном облаке преобладает суммарный отрицательный заряд, который за счет эффекта электростатической индукции наводит на

поверхность склона вулкана положительный заряд; во-вторых, высокая скорость при боковом сносе эруптивного облака (более 10 м/с), способствует созданию условий турбулентности. Также орография вулкана Эбеко – его невыраженный конус образуют сложный рельеф, что способствует возникновению турбулентности. Такие условия распространения обеспечивают перемешивание частиц в нижней области эруптивного облака и их контактной перезарядки от поверхности положительным знаком. В результате формируется положительный объемный заряд в нижней области.

Для обоснования предложенной феноменологической особенности формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака автором был проведен эксперимент по физическому моделированию пепловых облаков с одновременной регистрацией  $V'$  ЭПА.

## ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

### 4.1. Эксперимент по физическому моделированию пепловых облаков с одновременной регистрацией градиента потенциала электрического поля атмосферы

С целью исследований процессов формирования объемных зарядов в эруптивном облаке на вулкане Эбеко в период с 29.07.2020 по 05.08.2020 гг. были проведены наблюдения  $V'$  ЭПА в ближней зоне от кратера вулкана (подробно в главе 3 диссертации). На основании анализа полученных данных был поставлен вопрос о возможности формирования положительного объемного заряда в нижней области эруптивного облака при его боковом сносе, в результате двух основных факторов: первое - это наведенный положительный заряд на поверхность склона вулкана от основного заряда эруптивного облака, второе – возникновение турбулентного движения частиц пеплов на границе с поверхностью склона вулкана, которое возникает в его нижней области, когда оно распространяется с скоростью более 8-10 м/с.

Для подтверждения такой закономерности был проведен эксперимент по физическому моделированию пеплового облака и условий его распространения с одновременной регистрацией  $V'$  ЭПА. Предварительно были проведены лабораторные исследования пеплов.

**Лабораторные исследования пеплов.** Для исследований электризации эруптивного облака важным этапом является лабораторный анализ пеплов. С этой целью в феврале 2021 г. на расстоянии 2 км от активного кратера вулкана Эбеко были отобраны пеплы недавнего извержения (с момента извержения прошло 24 часа). Исследования пеплов выполнено в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

**Гранулометрический анализ пепла.** Гранулометрический анализ пепла выполнялся ситовым методом по стандартной методике с промывкой водой, т.к. в пробах преобладают пылеватые частицы. Использовались сита с размером ячеек (56, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 мкм). Для частиц менее 56 мкм применялся лазерный дифракционный анализатор «Analysette-22 COMPACT» фирмы FRITSCHE GmbH, позволяющий определять распределение частиц по размерам в диапазоне 0.3–300 мкм. Результаты анализа пробы ситовым методом и наиболее мелкой фракции (<56 мкм) методом лазерной дифракции

объединялись с помощью программного обеспечения «А-22» к лазерному дифракционному анализатору «Analysette-22 COMPACT».

**Химический анализ пепла.** Содержание породообразующих окислов в пробах пепла 2021 г. определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в АЦ ИВиС ДВО РАН на спектрометре «S4 PIONEER».

В таблице 4.1 представлены результаты определения главных элементов в пробах. По химическому составу пеплы соответствуют трахиандезитам. Исходные результаты анализа демонстрируют высокие потери при прокаливании (ппп) - 3.8%.

Таблица 4.1 – Результаты определения содержания главных элементов в исследуемых образцах (%)

| Проба  | SiO <sub>2</sub> | FeO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | MgO | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | ППП | Σ     |
|--------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-----|-------|
| Э-1-21 | 56.8             | 5.09 | 17.54                          | 2.31                           | 0.14 | 2.9 | 7.82 | 4.38              | 2.11             | 0.17                          | 3.8 | 99.76 |

Гранулометрический состав пеплов, отобранные в феврале 2021 г., представлен на диаграмме (рис. 4.1).

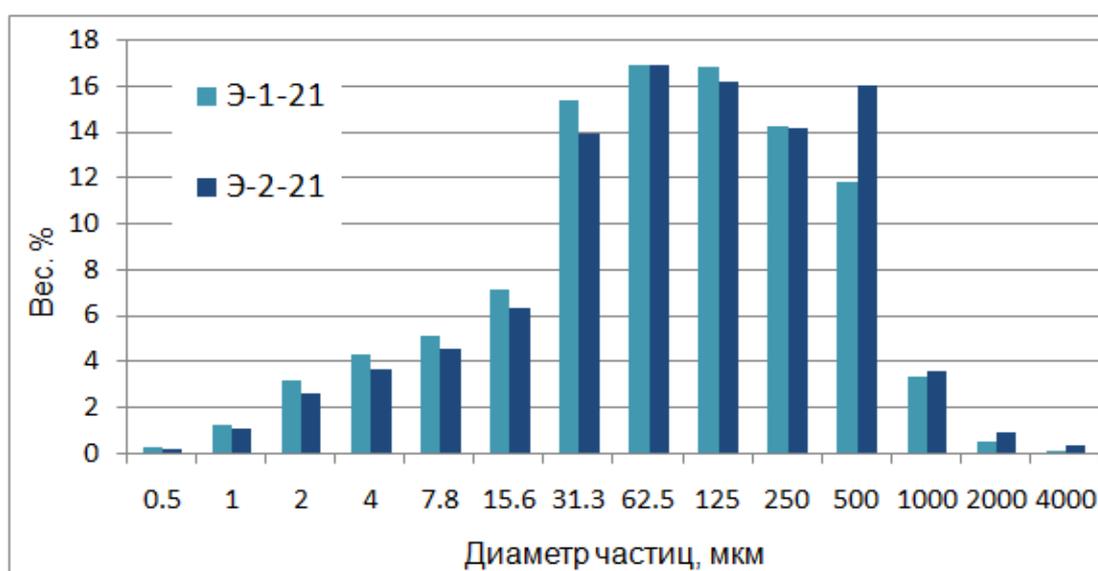


Рисунок 4.1 – Результаты определения гранулометрического состава пеплов проб Э-1-21 и Э-2-21

Пеплы относятся к пылеватым. Несмотря на небольшое расстояние отбора пробы от центра извержения, фракция ( $\leq 50$  мкм) составляет 43-49%.

**Исследования пеплов на естественную радиоактивность.** С целью анализа влияния естественной радиоактивности на формирования объемного заряда эруптивного облака

образцы пепла исследовались на радиоактивность с помощью гамма-спектрометра МКС-АТ6101 с блоком детектирования БДКГ-05. Спектрометр предназначен для измерения энергетического распределения гамма-излучения, измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, поиска и идентификации гамма-излучающих радионуклидов. Для исследования брались образцы пепла, выпавшие в районе ВПН1 (рис. 3.16). Результаты показали наличие пиков, связанных с распадом природных радиоактивных элементов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ .

В связи с наличием цепочки радиоактивного распада  $^{238}\text{U}$  в пеплах предполагается наличие радиоактивного  $^{226}\text{Ra}$  и возможна эскаляция дочернего продукта распада радия - радона. Радон за счет своей радиоактивности также способен ионизировать окружающее вещество при распаде. Для предварительной оценки возможного влияния эскаляции радона на формирование объемного заряда эруптивного облака образцы были помещены в герметичный контейнер с избыточным объемом 15 л. В контейнер вместе с пеплом был помещен радиометр RADEX MR107, предназначенный для оценки эквивалентной равновесной объемной активности радона (ОА Rn) и дочерних продуктов изотопов радона по величине объемной активности радона в воздухе. Результаты регистрации радона в контейнере приведены на рис. 4.2.

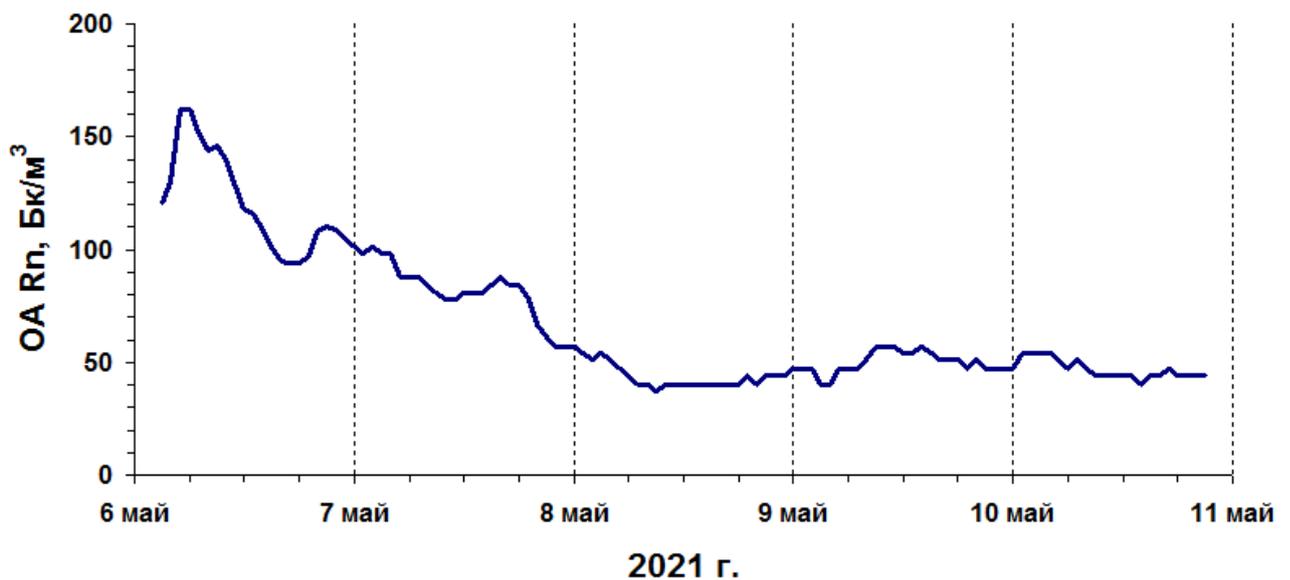


Рисунок 4.2 – Кривая изменения ОА Rn в объеме контейнера с пеплом

В момент закрытия крышки контейнера, ОА Rn в воздухе помещения составляла 100-150 Бк/м³. На рис. 4.2 видно, что попавший в момент закрытия крышки из воздуха помещения радон распался в течение двух суток, после чего кривая ОА Rn вышла на

постоянный равновесный уровень. При этом среднее значение концентрации радона на этом этапе составило  $\sim 47$  Бк/м<sup>3</sup>.

Температура контейнера и пепла в нем все время, пока проводились измерения, находилась в пределах 20-25°C. В работе [Юрков и др., 2017] были исследованы особенности выделения радона из образцов горных пород при их нагреве. В серии экспериментов было зарегистрировано увеличение ОА Rn при нагревании образцов и снижение до первоначального уровня при остывании. При этом значения ОА Rn при нагреве увеличиваются в 3–5 раз. Авторами [Юрков и др., 2017] сделан вывод, что количество выделяющегося дополнительного радона, существенно больше измеренного в условиях комнатной температуры. Предполагается, что радон находится в сообщающемся трещинно-поровом пространстве в слабосвязанном состоянии и при нагревании происходит его выделение. Исходя из этих представлений, а также с учетом того, что максимальная электризация эруптивного облака происходит в момент его образования, когда происходит фрагментация магмы и инжекция пепло-газовой струи, температура которой в этот момент может быть очень высокой (в случае в Эбеко, не превышающей 1000-1500°C), возможно выделение дополнительного радона, вносящего свой вклад в объемный заряд эруптивного облака. Это предположение требует дополнительных исследований и в рамках диссертации не рассматривается.

Помимо этого, был выполнен анализ суммарной альфа и бета активности образцов. Суммарная бета-активность пеплов Эбеко составила  $\sim 220$  Бк/кг, она обусловлена в первую очередь наличием радиоактивного <sup>40</sup>K.

*Пробоподготовка пеплов.* Перед проведением эксперимента пепел подвергался высушиванию в муфельной печи в течение 12 часов при температуре 100°C. Сухой пепел обеспечивал более эффективное заряджение пеплового облака. Масса закладки пеплов для каждого испытания составляла 20-30 г. Исходя из задач физического эксперимента на данном этапе исследований, разделение образцов пеплов для распыления по гранулометрическому составу не проводилось. Это условие в некоторой степени приближает опыты физического эксперимента к натурным условиям.

*Описание стенда для эксперимента.* С целью подтверждения влияния поверхности склона вулкан на процесс формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака был разработан экспериментальный стенд. Заряджение пеплового облака до значений напряженности, при которых возможны разряды [Cimarelli et al., 2014; Mendez, 2021] не требовалось, что позволило значительно упростить конструкцию.

Основными элементами конструкции стенда являются две конусные емкости (воронки) (рис. 4.3), которые образуют камеру для закладки пеплов. Внутренняя полость

воронку проклеена алюминиевой лентой. Пепловая камера не заземлена. К нижней воронке подключен воздушный компрессор, верхняя воронка задает направление инъекции пепловой смеси. В нижней воронке установлен клапан, который запирает пепловую камеру и не позволяет пеплу попасть в компресс. Выброс пеплов из камеры происходит за счет подачи в воронку 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 результате формируется заряженное пепловое облако. Для задания направления распространения и скорости распространения пеплового облака, на стенд установлен регулируемый вентилятор с диффузором. Это позволило моделировать направление распространения пеплового облака и его скорость (рис. 4.3). Моделируемое пепловое облако очевидно на много порядков меньше в размере реального эруптивного облака, поэтому логично предположить, что и эффект электростатической индукции на поверхность склона вулкана будет более значительным, чем от моделируемого пеплового облака. Чтобы усилить эффект перераспределения зарядов между нижней областью пеплового облака и поверхностью была установлена заземленная металлическая сетка. В конце сетки устанавливались электростатические флюксометры: положение А – 0.5 м от пепловой камеры, положение В – 1 м, положение С - 5 м (рис. 4.3). Проводились опыты с одним флюксометром, а также с одновременной регистрацией  $V'$  ЭПА в трех позициях. Во время экспериментов велась видеозапись с частотой 250 кадров в секунду.

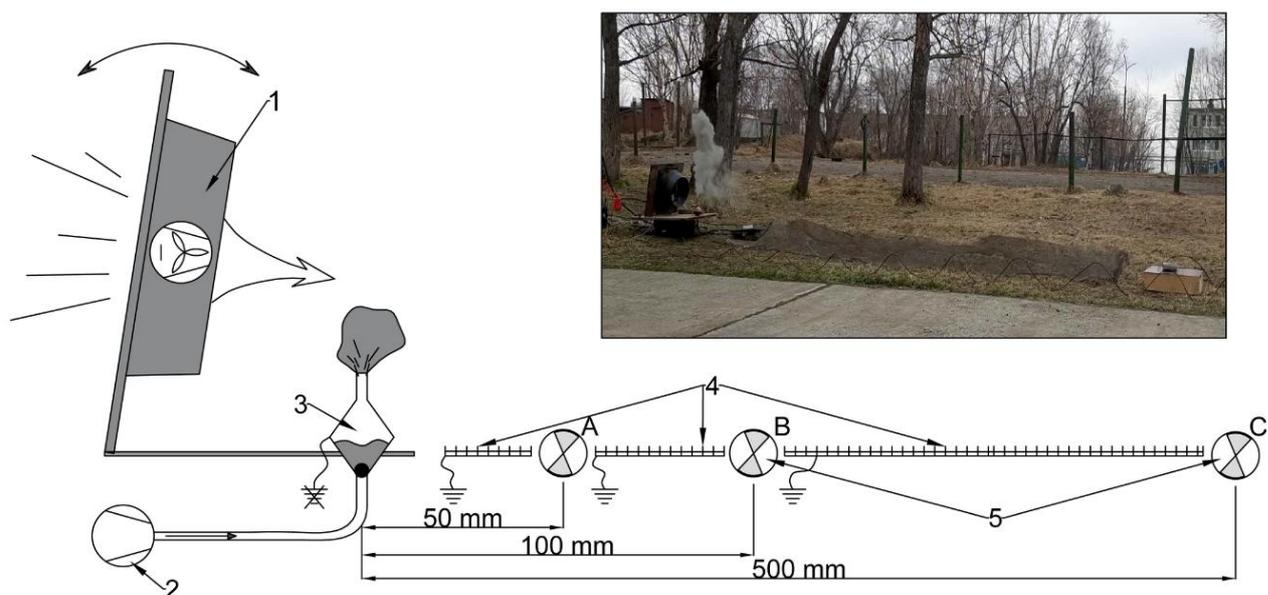


Рисунок 4.3 – а – Схема стенда для проведения физического эксперимента по моделирования объемного заряда эруптивного облака; б – фотография эксперимента. 1 – вентилятор, имеет регулировку скорости воздушного потока и регулировку угла наклона относительно горизонтали, что позволяет смоделировать направление и скорость распространения

пеплового облака; 2 – компрессор, обеспечивает подачу сжатого воздуха в пепловую камеру 3, пепловая камера внутри проклеена алюминиевой лентой, пепловая камера 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 флюксметра

*Физический эксперимент по регистрации I типа отклика.* В этом случае диффузор вентилятора устанавливался в такое положение, чтобы и верхняя и нижняя области пеплового облака распространялись над поверхностью так, чтобы не было взаимодействия нижней области пеплового облака с металлической сеткой. С помощью вентилятора обеспечивалась различная скорость движения распыленного пепла. Было проведено множество серий опытов, в результате которых зарегистрированы отрицательные полярности (рис. 4.4б), в том числе и в тех случаях, когда были произведены попытки регистрации III и IV типов сигналов. Данные физического моделирования пеплового облака согласуются с тем, что в эруптивном облаке эксплозий вулкана Эбеко преобладает отрицательный суммарный заряд.

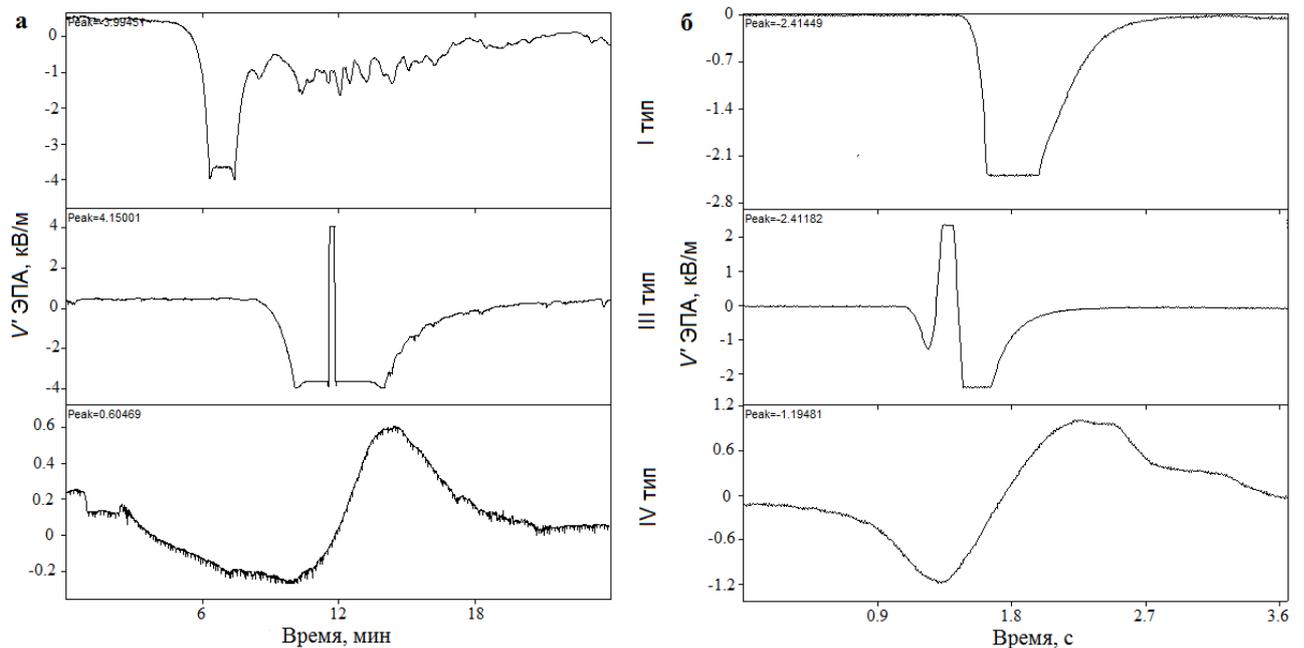


Рисунок 4.4 –Примеры зарегистрированных откликов градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $V' \text{ ЭПА}$ ) I тип, III тип, IV тип: а – по данным наблюдений на вулкане; б – по данным физического эксперимента

*Физический эксперимент по регистрации III типа отклика.* Для этого случая распыление пепла проводилось под меньшим углом к горизонтали, так чтобы нижняя часть пеплового облака соприкасалась с металлической сеткой, которая установлена перед

флюксметрами в позиции А или В (рис. 4.3). В результате серии из 7 опытов были зарегистрированы отклики, близкие по форме записи на отклики III типа (рис. 4.4 а, б).

Проведем анализ динамики кривой  $V'$ ЭПА с кадрами видеосъемки физического эксперимента по моделированию III типа сигнала (рис. 4.5). На момент времени  $t_1$  формируется верхняя область пеплового облака, выделена в синий овал (рис. 4.5 б), также на данный момент времени  $t_1$  хорошо выделяется нижняя область пеплового облака, которая взаимодействовала с металлической сеткой, эта область выделена красным овалом (рис. 4,5 б).

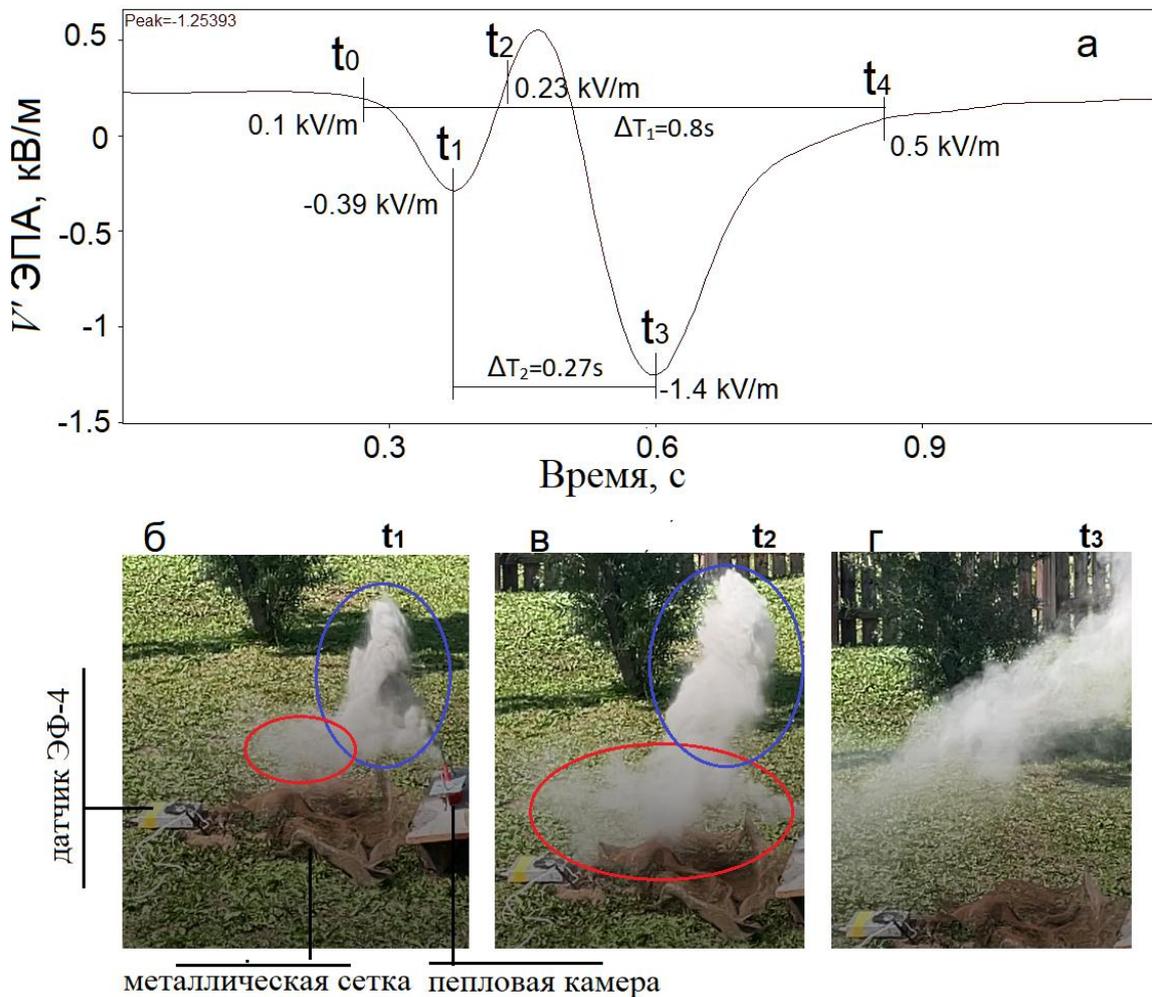


Рисунок 4.5 – Физический эксперимент III типа сигнала градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $V'$ ЭПА): а – зарегистрированный отклик  $V'$ ЭПА; б, в, г – кадры видеосъемки на момент времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . В момент времени  $t_1$  в  $V'$ ЭПА (а) зарегистрировано значение -0.39 кВ/м, которое соответствует суммарному вкладу напряженности от верхней отрицательно заряженной и нижней положительно заряженной области пеплового облака (б). В  $t_2$   $V'$ ЭПА = 0.23 кВ/м нижняя область имеет больший объем и локализована вблизи датчика. В  $t_3$  над датчиком распространяется только верхняя область пеплового облака в  $V'$ ЭПА зарегистрировано максимальное отрицательное значение – 1.4 кВ/м

Положительная область пеплового облака на данный момент времени еще имеет не значительный объем и локализована не над датчиком электрического поля, в то время как верхняя область пеплового облака занимает значительный объем относительно всего пеплового облака. На момент времени  $t_1$  зарегистрировано отрицательное возмущение на записи кривой  $V'$  ЭПА (рис. 4.5 а), значение которого равно  $-0.39 \text{ kV/m}$ . Это отрицательное возмущение  $V'$  ЭПА соответствует суммарному электростатическому полю, которое сгенерировано областями пеплового облака с отрицательным и с положительным объемными зарядами (рис. 4.5 б). На момент времени  $t_2$  объем нижней области пеплового облака, которое взаимодействовали с металлической сеткой увеличен и центр этой области находится ближе к датчику электрического поля. На этот момент времени зарегистрировано положительное возмущение на записи кривой  $V'$  ЭПА, значение которого равно  $0.23 \text{ kV/m}$ . Это значение соответствует суммарному полю от области с положительным зарядом и области с отрицательным зарядом (рис. 4.5 с). На момент времени  $t_3$  над датчиком электрического поля распространяется только верхняя область пеплового облака (рис. 4.5 d), зарегистрировано максимальное отрицательное возмущение на записи кривой  $V'$  ЭПА (рис. 4.5 а), значение которого равно  $-1.4 \text{ kV/m}$ .

*Физический эксперимент по регистрации IV типа отклика.* Для моделирования IV типа отклика, датчик  $V'$  ЭПА устанавливался в позиции С, параметры потока воздуха и положение диффузора вентилятора подбирались таким образом, чтобы нижняя область пеплового облака взаимодействовала с заземленной металлической сеткой (рис. 4.3). В некоторых испытаниях вентилятор не был включен, пепловое облако распространялось в условиях естественной атмосферы. В результате серии из 7 опытов были зарегистрированы отклики (рис. 4.4 б) по форме подобные IV типу, которые были зарегистрированы при наблюдениях (рис. 4.4а).

В этом случае нижняя область пеплового облака значительно дольше взаимодействовала с сеткой, чем при эксперименте для III типа сигнала. В результате экспериментов был зарегистрирован диполь типа "negative-positive" (рис. 4.4б), по форме сигнала соответствуют наблюдениям (рис. 4.4а; табл.3.6 №19, №20). Кроме того, был зарегистрирован диполь типа "positive-negative", а также зарегистрированы чисто положительные отклики, которые соответствуют II типу согласно классификации откликов по табл. 3.5 и 3.6. Такой набор сигналов связан с кинематикой распространения нижней области пеплового облака относительно верхней области. Если нижняя область пеплового облака распространяется медленнее, то регистрируется диполь, соответствующий натурным наблюдениям (рис. 4.4а). Если нижняя область распространяется быстрее, то регистрируется диполь, обратной конфигурации. Регистрация только положительного отклика была связана

с тем, что верхняя область пеплового облака двигалась либо в сторону от датчика, либо поднималось вверх, в то время как нижняя область пеплового облака проходила в зоне регистрации. Такое закономерное распределение откликов согласуется с результатами анализа долговременных данных в SKR (глава 3 диссертации).

Таким образом, III тип сигнала может свидетельствовать о самом процессе перераспределения зарядов между частицами пеплов в нижней области пеплового облака и поверхностью металлической сетки, а сигнал IV типа свидетельствует о том, что формирование биполярного объемного электростатического заряда находит на стадии, когда объемные заряды нижней области и верхней области начинают компенсировать друг друга. Для подтверждения последовательности возникновения III и IV типа сигналов был проведен дополнительный эксперимент с одновременной регистрацией  $V'$ ЭПА в трех точках от пепловой камеры (А-0.5 м, В-1.5 м и С-5 м) (рис. 4.6). Результаты этого эксперимента показаны на рис. 4.6. Здесь хорошо прослеживается суммарный эффект напряженности электрического поля от противоположно заряженных областей пеплового облака, который регистрируется флюксметрами. Максимальный положительный импульс наблюдается в позиции А от пепловой камеры (рис. 4.6 а), в этот момент пепловое облако характеризуется максимальной концентрацией частиц пепла на единицу объема (пепловое облако компактное, не распылённое). Верхняя часть занимает больший объем, чем нижняя, которая локализована практически под ней (рис. 4.6 а). В момент, когда пепловое облако прошло второй датчик В (рис. 4.3), пространственное распределение зарядов поменялось. Положительный заряд увеличился в объеме, а концентрация пепла в этой области уменьшилась, верхний отрицательный заряд также увеличился в объеме с уменьшением концентрации частиц пеплов. При этом расстояние между объемными зарядами увеличивается (данные видеонаблюдения). Такое развитие пеплового облака наблюдается и в позиции третьего датчика. Соответственно в точке регистрации С (рис. 4.3) расстояние между объемными зарядами стало еще больше. Это прослеживается и по характеру зарегистрированных диполей в  $V'$ ЭПА. Положительный сигнал, зарегистрированный в точке регистрации В (рис. 4.3) по амплитуде и по длительности меньше, чем в С. Это связано с тем, что верхний отрицательный заряд в В располагался ниже (рис. 4.6 б), чем в тот момент, когда проходил над С (рис. 4.6 в). По этой же причине в позиции С (рис. 4.6 в) практически незаметен отрицательный вклад поля.

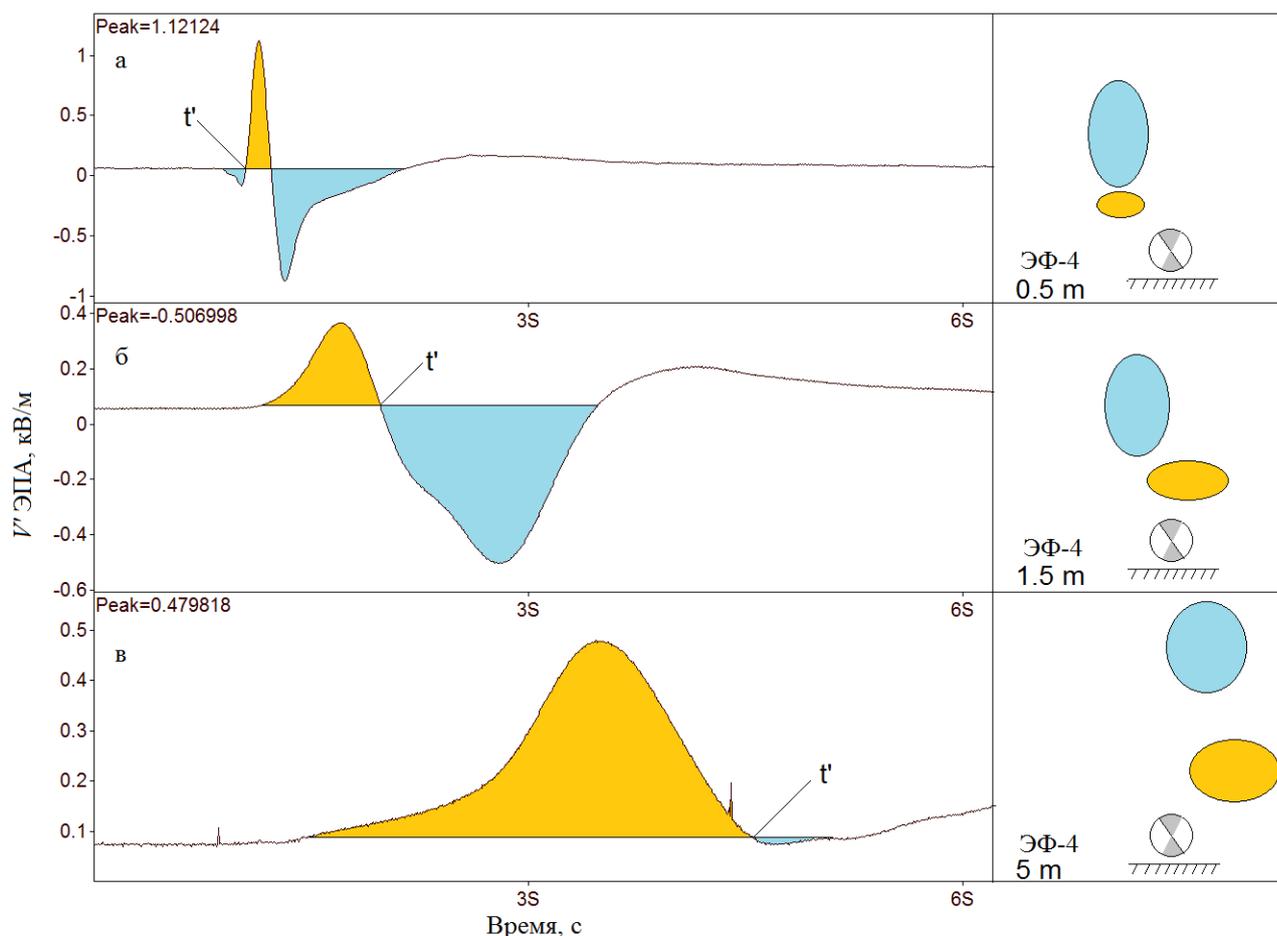


Рисунок 4.6 – Результаты физического эксперимента с одновременной регистрацией градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $V'$  ЭПА) в позициях А, В, С. Датчики расположены на расстояниях: а – 0.5 м от пепловой камеры; б – на расстоянии 1.5 м; в – на расстоянии 5 м. По данным видеорегистрации построены схема расположения объемных электростатических зарядов относительно флюксметров на момент времени  $t'$

По совокупности опытов определено, что для возможности регистрации III и IV типов сигналов  $V'$  ЭПА во время физического эксперимента обязательными критериями являются:

- 1) пепловое облако должно быть компактным и максимально насыщенным пеплом, то есть на единицу объема иметь значительную концентрацию пепла;
- 2) пепловое облако обязательно должно пройти вдоль металлической сетки, таким образом чтобы было взаимодействие нижней области пеплового облака с поверхностью сетки.

Соблюдение таких критериев позволило зарегистрировать I и IV тип отклика.

Необходимо обратить внимание, что предложенная схема физического эксперимента в сочетании с полученными результатами проведенных экспериментов указывает на то, что эти результаты, по всей видимости, не связаны с феноменологической особенностью SDBC. Иначе формирование дипольной структуры наблюдалось бы и при моделировании I типа сигнала, когда пепловое облако не взаимодействовало с металлической сеткой. Также на это

указывают характерные времена процесса формирования II типа отклика (рис. 4.5). Длительность всего сигнала (рис. 4.5а)  $\Delta t_1$  составляет 0.8 с, такое время соответствует скорости распространения пеплового облака (2.5-3 м/с). При этом время влияния положительного заряда на суммарное поле от пеплового облака соответствует  $\Delta t_2$  и составляет 0.27 с (рис. 4.5а). Очевидно, что за такое время формирование биполярной структуры согласно SDBC произойти не могло.

Логично то, что предложенная физическая модель формирования объемного заряда в нижней области эруптивного облака будет тем эффективнее, чем выше концентрация частиц пепла на единицу объема. В таких условиях количество пар частиц пеплов, которые находятся за пределами критического расстояния будет минимальным. Под термином критическое расстояние подразумевается критическое начальное смещение, за пределами которого объекты под воздействием Кулоновских сил не смогут столкнуться. Такой подход учета эффективности столкновений заряженных частиц пеплов описан в Pollastri (2021), где предложена теоретическая основа для количественной оценки Кулоновских сил на процессы сталкивания приводящих к отскоку пепловых частиц или к их агрегации. Pollastri, (2021) показывает, что концентрация частиц пеплов на единицу объема значительно влияет на количество столкновений. Концентрация в  $53 \text{ мкг/м}^3$  соответствует 500 столкновениям в день, а концентрация  $2000 \text{ мкг/м}^3$  соответствует 10000 столкновениям в день. В ходе физического эксперимента были проведены замеры массы пеплов в камере до распыления и после. В результате определялась масса распыленного пеплового облака, которая в среднем составила 5-7 % от изначальной массы заложенного пепла в камеру. Таким образом, на основании данных видеонаблюдения можно дать оценку концентрации пепла при физическом моделировании, которая составила порядка  $5-7 \text{ г/м}^3$  при размере частиц пепла 1-100 мкм. Это на 6 порядков больше, чем значение, заложенное в расчеты Pollastri (2021).

Проведенная серия физических экспериментов не может отражать всей совокупности процессов электризации эруптивного облака. Определенной сложностью является масштабное сопоставление реального извержения и проводимого эксперимента, кроме того эруптивное облако представлено продуктами извержения как твердой фазы, так и газами. Метеорологическая обстановка также существенно влияет на формирование объемных зарядов в эруптивном облаке при его распространении. С другой стороны, в рамках масштаба физического эксперимента, получены сигналы в  $V'$  ЭПА, сопоставимые с данными наблюдений на вулкане, для которых электростатические эффекты на много порядков выше.

#### 4.2. Математическое моделирование флуктуаций электрического поля атмосферы, связанных с распространением эруптивного облака на стадии плавучести

В 3 главе диссертации на основании результатов исследования откликов  $V'$  ЭПА, связанных с распространением эруптивного облака от эксплозий вулкана Эбеко, сделано предположение о взаимосвязи типов зарегистрированных откликов и форм-фактора эруптивного облака на момент его распространения вблизи пункта регистрации. При этом конфигурация объемных электростатических зарядов в эруптивном облаке для форм-факторов типа А и В следующая: в верхней области сформирован объемный отрицательный заряд, в нижней области сформирован объемный положительный заряд. Таким образом, эруптивное облако с типом форм-фактора А и В представлено диполем. Условия ветровой стратификации атмосферы определяют взаимное пространственное расположение нижней и верхней области эруптивного облака на момент регистрации, что в свою очередь определяет тип зарегистрированного сигнала  $V'$  ЭПА. Для подтверждения такой закономерности проведем математическое моделирование откликов в вариациях  $V'$  ЭПА на распространения эруптивного облака с различными вариантами взаимного расположения верхней и нижней области.

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. Имея записи  $V'$  ЭПА и зная параметры распространения эруптивного облака в пространстве, можно судить о локализации характерных объемных электростатических структур в нем и об изменении распределения электрических зарядов в эруптивном облаке.

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. 4.7 представлена схема расположения точечных зарядов и система координат.

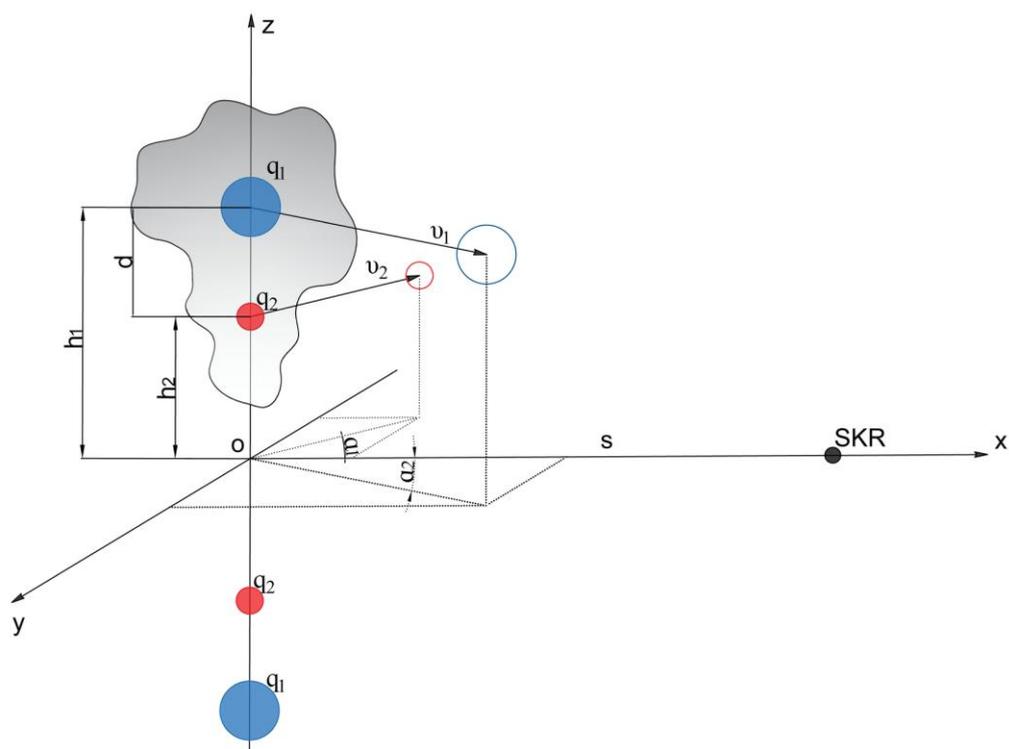


Рисунок 4.7 – Схема распределения эффективных электрических зарядов в эруптивном облаке извержений вулкана Эбеко на стадии его распространения в условиях ветровой стратификации атмосферы

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  $q_2$  (рис. 4.7). Тогда на поверхности Земли ( $z=0$ ) отличная от нуля будет только вертикальная компонента напряженности электрического поля, которая соответствует выражению [Чернева, 2007, 2018; Адушкин, 2018]:

$$E_z = \frac{q_1 h_1}{2\pi\epsilon_0 R_1^3} + \frac{q_2 h_2}{2\pi\epsilon_0 R_2^3}, \quad (4.1)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $R_1, R_2$  – расстояние от SKR до заряда  $q_1, q_2$ .

Основными параметрами, влияющими на результат регистрируемого отклика на момент распространения эруптивного облака в SKR, будут углы  $\alpha_1, \alpha_2$  и эффективное расстояние  $d$  между центрами объемных электростатических зарядов (рис. 4.7). Параметры углов  $\alpha$  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  $q_2$  (рис. 4.7). При условии, что SKR расположен на расстоянии  $S$  на оси  $ox$  согласно схеме на рис. 4.7, выражение (4.1) примет вид:

$$E_z(t) = \frac{q_1 h_1}{2\pi\epsilon_0((S-v_1 t \cos\alpha_1)^2 + (v_1 t \sin\alpha_1)^2 + h_1^2)^{3/2}} + \frac{q_2 h_2}{2\pi\epsilon_0((S-v_2 t \cos\alpha_2)^2 + (v_2 t \sin\alpha_2)^2 + h_2^2)^{3/2}} \quad (4.2)$$

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

Рассчитаем идеализированные формы откликов согласно схеме распределения зарядов на рис. 4.7 и на основании выражения (4.2). Рассмотрим, как будет влиять скорость распространения верхней и нижней области эруптивного облака на тип регистрируемого сигнала. Входные параметры показаны в табл. 4.2. На рис. 4.8 показаны результаты математического моделирования движения заряженного диполя с заданными параметрами. По результатам моделирования видно, что скорость распространения нижней и верхней области 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). Когда скорости нижней и верхней области эруптивного облака различны, наблюдается смещение положительного импульса в отрицательной области сигнала (модельная кривая №2, 3). Для больших отличий скоростей верхней и нижней области эруптивного облака, будут регистрироваться дипольные сигналы – IV тип сигнала (модельная кривая №4, 5), 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".

Таблица 4.2 – Входные параметры моделирования отклика  $V'$  ЭПА ( $E_z$ ) в зависимости от скорости распространения эруптивного облака

| № | S    | $v_1$ , м/с | $v_2$ , м/с | $h_1$ , м | $h_2$ , м | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $q_1$ | $q_2$ |
|---|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-------|-------|
| 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 |

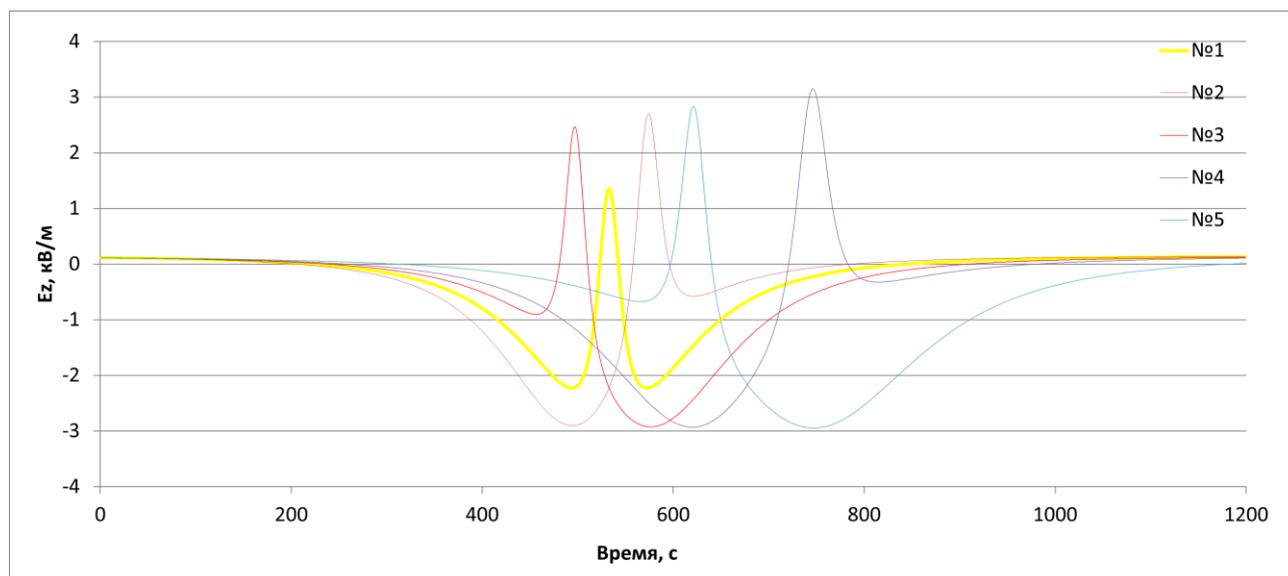


Рисунок 4.8 – Формы идеализированных откликов  $E_z$ . Параметры расчетной модели показаны в табл. 4.2

Рассмотрим, каким образом меняется тип сигнала в зависимости от углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 4.7). Введение данного параметр позволяет учитывать направление распространения областей эруптивного облака относительно оси ОХ согласно схеме на рис. 4.7. Для расчетов рассмотрим модельную кривую №1 (табл. 4.2, рис. 4.8) и введем различные конфигурации углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В табл. 4.3 представлены входные параметры математической модели с различными параметрами угла  $\alpha_1$ . Смещение заряда  $q_1$  по оси ОУ определяется из выражения  $v_1 t \sin \alpha_1$ , согласно схеме на рис. 4.7. На рис. 4.9 показаны расчетные кривые для различных значений угла  $\alpha_1$ . Таким образом, при увеличении смещения заряда  $q_1$  по оси ОУ, его влияние на сигнал в SKR ослабевает, в результате увеличивается положительный импульс связанный с движением заряда  $q_2$ .

Таблица 4.3 – Входные параметры моделирования отклика в зависимости от угла  $\alpha_1$

| № | S    | $v_1$ , м/с | $v_2$ , м/с | $h_1$ , м | $h_2$ , м | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $q_1$ | $q_2$ |
|---|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-------|-------|
| 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 |

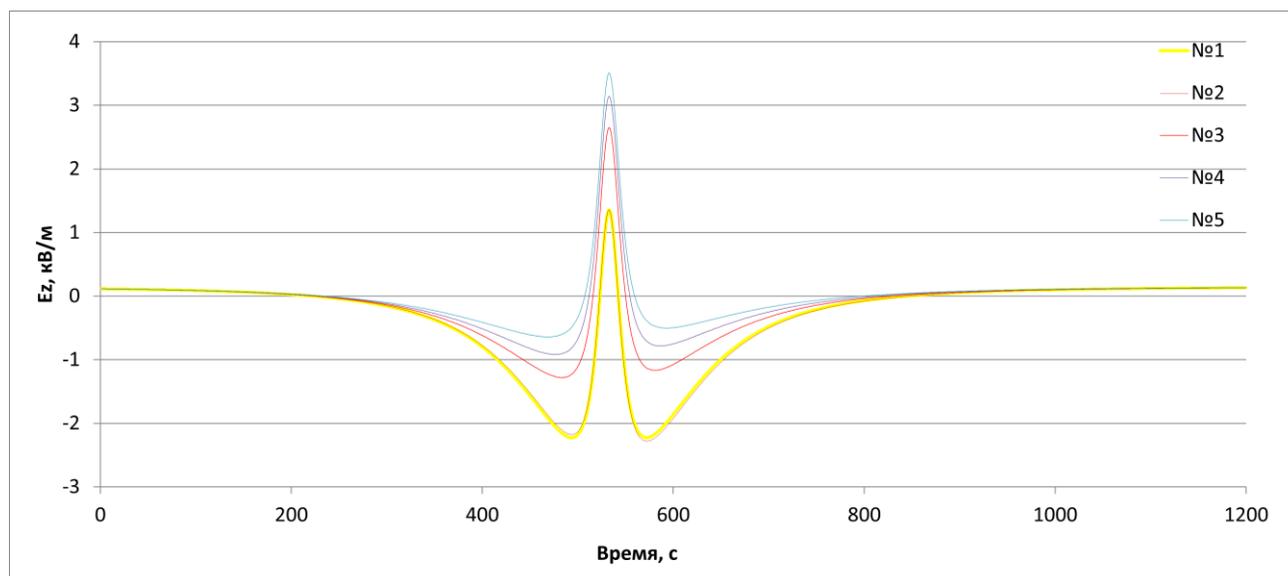


Рисунок 4.9 – Формы идеализированных откликов  $E_z$  в зависимости от  $\alpha_1$ . Параметры расчетной модели показаны в таблице 4.3

В табл. 4.4 представлены входные параметры математической модели с различными параметрами угла  $\alpha_2$ . Смещение заряда  $q_2$  по оси ОУ определяется из выражения  $v_2 t \sin \alpha_2$ , согласно схеме на рис. 4.7. На рис. 4.10 показаны расчетные кривые для различных значений угла  $\alpha_2$ . Таким образом, при увеличении смещения заряда  $q_2$  по оси ОУ, 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  $\alpha_2$  (табл. 4.4) происходит значительно быстрее, чем уменьшение влияния заряда  $q_1$  при изменении угла  $\alpha_1$  (табл. 4.3). Этот результат согласуется с натурными наблюдениями, по результатам которых показано, что регистрация III типа отклика  $V'$  ЭПА, возможно только в тех случаях, когда нижняя область эруптивного облака распространяется над пунктом регистрации.

Таблица 4.4 – Входные параметры моделирования отклика в зависимости от угла  $\alpha_2$

| № | S    | $v_1$ , м/с | $v_2$ , м/с | $h_1$ , м | $h_2$ , м | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $q_1$ | $q_2$ |
|---|------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-------|-------|
| 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 |

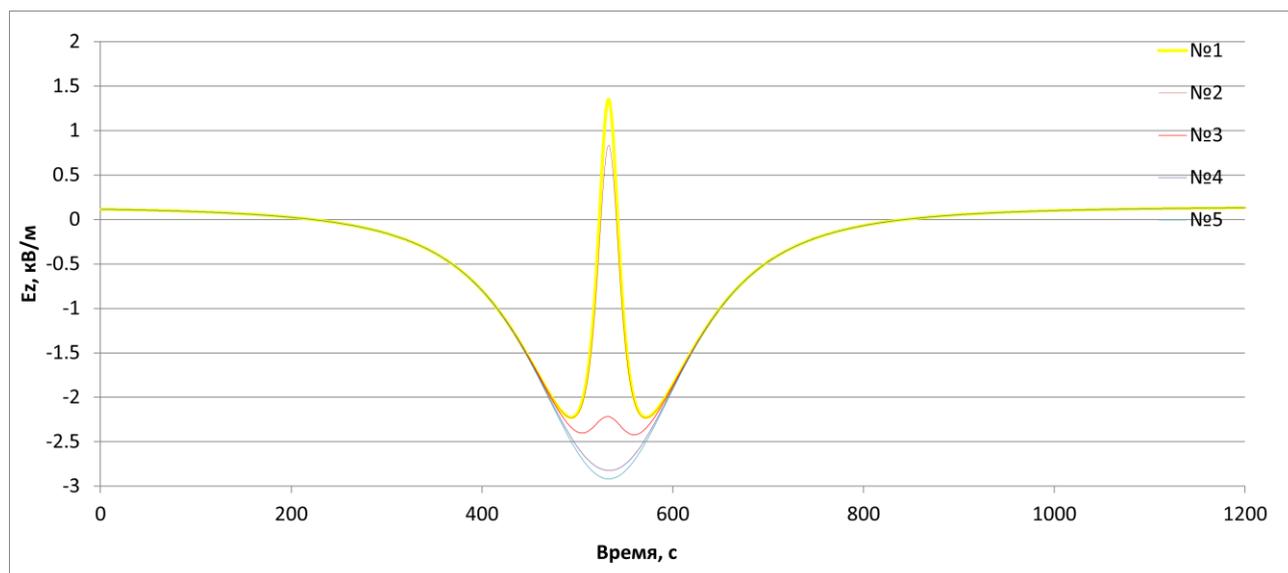


Рисунок 4.10 – Формы идеализированных откликов  $E_z$  в зависимости от  $\alpha_2$ . Параметры расчетной модели показаны в таблице 4.3

Далее в качестве примеров выполним математический анализ зарегистрированных данных на вулканах Эбеко и в. Шивелуч.

Рассмотрим взрывное извержение, произошедшее 10.10.2019 г в 19:14 UTC на вулкане Эбеко. Эруптивное облако от этого извержения поднялось на высоту 2000 ( $\pm 200$ ) м н.у.м. Расчетные параметры движения зарядов облака для данного случая представлены в таблице 4.5. Результаты расчета по модели представлены на рис. 4.11.

Таблица 4.5 – Входные параметры моделирования отклика V' ЭПА, связанного с распространением эруптивного облака над SKR, которое возникло в результате взрывного извержения в. Эбеко 10.10.2019 г.

| $v_1$ , м/с | $v_2$ , м/с | $h_1$ , м | $h_2$ , м | S    | $\alpha_2$ | $q_1$ | $q_2$ | $E_{фон}$ , кВ/м |
|-------------|-------------|-----------|-----------|------|------------|-------|-------|------------------|
| 10.7        | 13          | 1700      | 500       | 7486 | 0          | -0.45 | 0.021 | 0,197            |

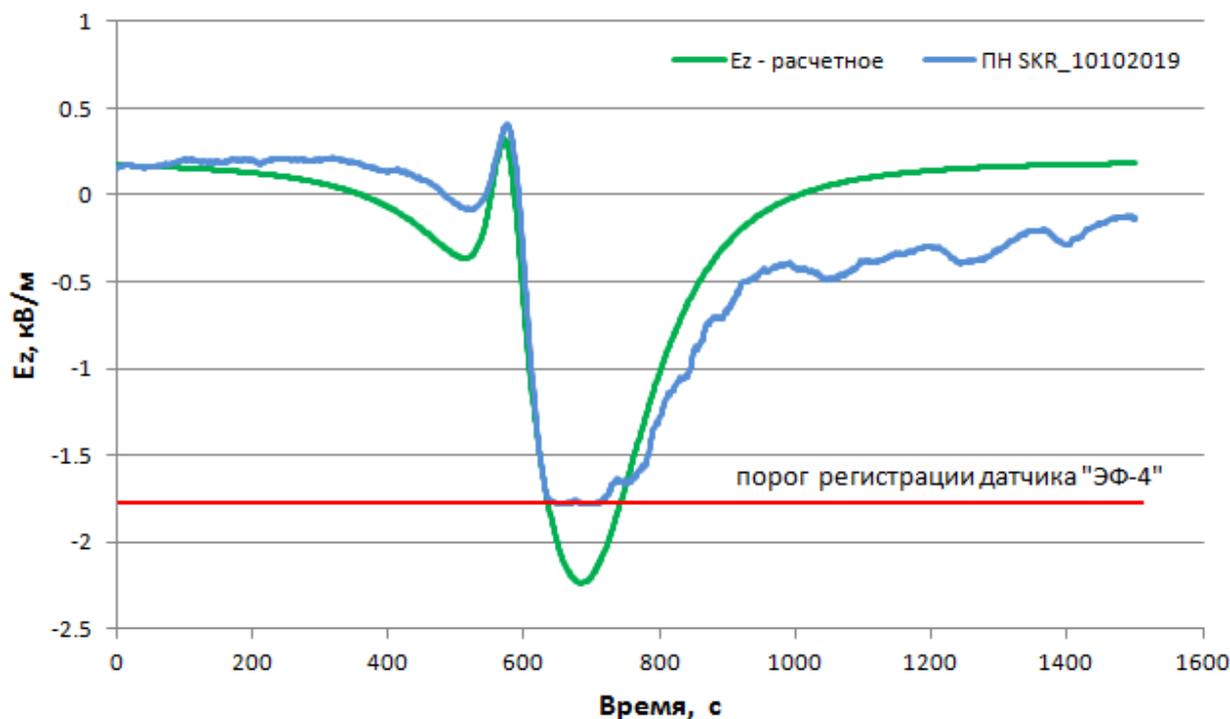


Рисунок 4.11 – Расчетная модель отклика  $E_z$  связанного с распространением эруптивного облака над SKR, которое возникло в результате эксплозивного извержения в. Эбеко 10.10.2019 г

Электростатическая структура эруптивного облака непрерывно эволюционирует, в результате различных физических процессов в нем формируются объемные униполярные области. Во время распространения эруптивного облака происходит непрерывная седиментация продуктов извержения в гравитационном поле, при взаимодействии заряженных продуктов извержения с воздухом, который имеет высокую влажность, процессы релаксации зарядов в нем протекают значительно быстрее. Кроме того в ближней зоне от кратера вулкана формирование объемных униполярных зарядов протекает наиболее динамично. Во многих случаях, когда эруптивное облако проходило над или вблизи SKR, отклики  $V''$ ЭПА, не были зарегистрированы. Таким образом, рассматривать эруптивное облако как точечный заряд и давать точные оценки электростатического заряда в нем в ближней зоне достаточно сложно. И такая задача тем более усложняется при записи  $V''$ ЭПА в одном пункте регистрации. На рис. 4.11 показаны данные регистрации  $V''$ ЭПА и дана оценка основных параметров электростатической структуры эруптивного облака на момент его регистрации над пунктом наблюдения. Достоверность аппроксимации кривой расчетной модели и наблюдаемых данных составляет 0.89. При этом наблюдаются и значительные расхождения форм кривых. Особенно после момента 800 с, что связано 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.

Рассмотрим эксплозивное извержение, произошедшее 14.06.2017 г в 16:29 UTC на вулкане Шивелуч. По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) эруптивное облако от этого извержения поднялось на высоту 12000 м н.у.м. Ветровая стратификация атмосферы была такая, что верхняя область эруптивного облака распространялось в северо-северо-восточном направлении, а средняя и нижняя область эруптивного облака распространились в южном юго-восточном направлении. В результате в KLY был зарегистрирован отклик в вариациях  $V'$ ЭПА. Расчетные параметры движения зарядов эруптивного облака для данного случая представлены в таблице 4.6. Результаты расчета по модели представлены на рис. 4.12.

Таблица 4.6 – Входные параметры моделирования отклика  $V'$ ЭПА, связанного с распространением эруптивного облака над KLY, которое возникло в результате эксплозивного извержения в Шивелуч 14.06.2017 г.

| $v_1$ , м/с | $v_2$ , м/с | $h_1$ , м | $h_2$ , м | S     | $\alpha_2$ | $q_1$ | $q_2$ | $E_{\text{фон}}$ , кВ/м |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------|------------|-------|-------|-------------------------|
| 7.35        | 6.95        | 5700      | 4150      | 50000 | 0          | -26   | 15    | 0.01                    |

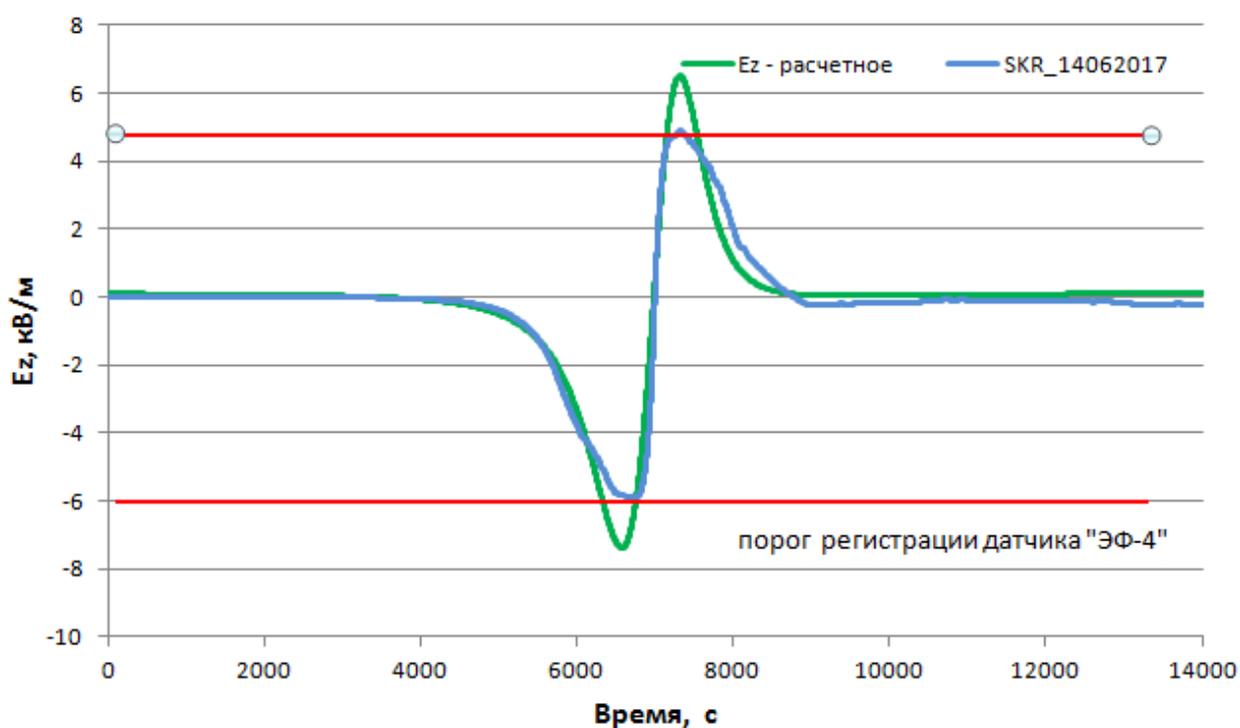


Рисунок 4.12 – Расчетная модель отклика  $E_z$  связанного с распространением эруптивного облака над KLY, которое возникло в результате эксплозивного извержения в Шивелуч 14.06.2017 г

Достоверность аппроксимации расчетной модели и наблюдаемых данных составляет 0.87. При этом наблюдаются и значительные расхождения форм кривых обусловленные тем, что при регистрации данных в KLY, регистрируемое поле ограничено динамическим диапазоном аппаратуры.

### 4.3. Выводы к главе 4

#### Результаты физического эксперимента

На основании результатов долговременных наблюдений  $V'$ ЭПА в SKR и в ближней зоне вулкана Эбеко было выдвинуто предположение о формировании положительного объемного заряда в нижней области эруптивного облака при боковом сносе эруптивного облака со скоростью более 10 м/с, в результате в приграничном слое вблизи поверхности Земли возникает турбулентное движение, этот процесс способствует контактному перезарядению частиц пеплов от поверхности склона вулкана. По всей видимости, этот процесс способствует формированию объемного заряда в нижней области эруптивного облака. Для подтверждения такого процесса выполнены работы по физическому эксперименту.

Разработан стенд, который позволил физически моделировать пепловое облако и его боковой снос.

В результате выявлено:

1. Отрицательное значение  $V'$ ЭПА, регистрируется во всех случаях, когда пепловое облако не взаимодействовало с металлической сеткой.
2. III тип сигнала регистрировался только тогда, когда пепловое облако было компактным (не распыленно), и его нижняя область распространялась у поверхности металлической сетки.
3. IV тип сигнала свидетельствует о логичной эволюции III типа сигнала, и связан с взаимным пространственным расположением верхней и нижней области пеплового облака на момент регистрации.

#### Результаты математического моделирования

Представлены результаты анализа идеализированных моделей электростатической структуры эруптивного облака. Показано, что пространственная конфигурация униполярных зарядов в эруптивном облаке, которое зависит от условий ветровой стратификации, определяет тип регистрируемого отклика в SKR.

На основании результатов долговременных наблюдений  $V'$ ЭПА в SKR и натурального эксперимента по регистрации  $V'$ ЭПА в двух временных пунктах наблюдения на вулкане

Эбеко, был зарегистрирован III тип отклика  $V'$  ЭПА, который возможен только тогда, когда эруптивное облако распространяется над пунктом регистрации. По результатам математического моделирования показано, что регистрация III типа отклика  $V'$  ЭПА действительно возможна только при условии распространения эруптивного облака над пунктом регистрации.

## 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 KZY (п. Козыревс, ~100 км от вулкана) 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  $V'$  ЭПА действительно возможна только при условии, когда нижняя область эруптивного облака распространяется максимально близко к пункту регистрации.

На основании результатов долговременных наблюдений  $V'$  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  $V'$  ЭПА. В результате выявлено: отрицательное значение  $V'$  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  $V'$  ЭПА определяют условия ветровой стратификации атмосферы. В результате рассчитаны «идеализированные» отклики, которые соответствуют выделенным 4 типам отклика  $V'$  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  $V'$  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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, В.В. Электрические поля техногенных и природных процессов / В.В. Адушкин, С.П. Соловьев, А.А. Спивак. –М: Геос, - 2018. – С. 487.
2. Аджиев, А.Х. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы / А.Х. Аджиев, А.Г. Клово, Т.В. Кудринская, Г.В. Куповых, Д.В. Тимошенко // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – 4. – С. 452-461. DOI: [10.1134/S0001433821040137](https://doi.org/10.1134/S0001433821040137).
3. Аджиев, А.Х. Влияние солнечного ветра на динамику электрического поля в приземном слое атмосферы / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых, З.М. Керефова, А.А. Черкесов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. 5. – С. 114-122. DOI 10.23683/2311-3103-2019-5-114-122.
4. Аджиев, А.Х. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых // Доклады академии наук. – 2015. –Т. 462. – 2. – С. 213–216. DOI: 10.7868/S0869565215080174.
5. Аджиев, А.Х. Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды / А.Х. Аджиев, С.Т. Тамазов // Метеорология и гидрология. – 1987. – 8. – С. 57-62.
6. Аджиев, А.Х. Анализ данных многолетних атмосферно-электрических наблюдений на территории Северо-Кавказского региона / А.Х. Аджиев, З.М. Керефова, А.Г. Клово, Т.В. Кудринская, Г.В. Куповых, Д.В. Тимошенко, А.А. Черкесов // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – С. 75-79.
7. Акбашев, Р.Р. Положительная аномалия в вариациях градиента потенциала атмосферного электрического поля, возникшего от сильного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г / Р.Р. Акбашев // Природная среда Камчатки: Материалы XIV региональной молодежной научной конференции, 14 апреля 2015г. – г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. – С. 131–142.
8. Акбашев, Р.Р. Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы на прохождение эруптивных облаков от вулкана Шивелуч (Камчатка). / Р.Р. Акбашев, П.П. Фирстов // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: Материалы V всероссийской научной конференция 23-25 мая 2018 г. – г. Санкт - Петербург: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – С. 349 – 353.
9. Акбашев, Р.Р. Измерения электрического поля атмосферы: результаты сверки электростатических флюксометров «ЭФ–4» и «Поле–2» / Р.Р. Акбашев, П.П. Фирстов, С.Ю. Хомутов, В.А. Ефимов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды V научно–технической конференции 27 сентября – 3

- октября 2015 г. – г. Петропавловск-Камчатский – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 197–201.
10. Акбашев, Р.Р. Грозная активность на действующих вулканах Камчатки 14 июля 2015 г. / Р.Р. Акбашев, П.П. Фирстов, В.А. Мочалов, С.Ю. Хомутов, Д.В. Мельников // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сборник материалов VI Сахалинской молодежной научной школы 3–8 октября 2016 г. – г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. – С. 216–219.
  11. Акбашев, Р.Р. Изменение градиента потенциала электрического поля атмосферы Земли при прохождении шлейфов вулканических извержений / Р.Р. Акбашев, П.П. Фирстов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы 11-15 сентября 2017 г. – г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 18-9.
  12. Акбашев, Р.Р. Электризация эруптивных облаков взрывов вулкана Эбеко и их особенность / Р.Р. Акбашев, П.П. Фирстов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды VII научно-технической конференции 29 сентября - 5 октября 2019 г. – г. Петропавловск-Камчатский – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 17-21.
  13. Анисимов, С.В. Измеритель вариаций напряженности электрического поля Земли / С.В. Анисимов, С.М. Крылов // Структура электромагнитного поля геомагнитных пульсаций: Сборник. – М.: Наука, 1980. – С. 158-163.
  14. Бабаханов, И.Ю. Первые результаты наблюдения атмосферного электрического поля с помощью электрометра CS110 на обсерватории «Паратунка», Камчатка / И.Ю. Бабаханов, С.В. Бутин, С.Э. Смирнов, С.Ю. Хомутов // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Сборник докладов международной конференции 29 августа - 02 сентября 2016 г. – г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2016. С. – 232-235.
  15. Белоусов, А.Б. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) –плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки / А.Б. Белоусов, М.Г. Белоусова // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 4–5. – С. 116-127.
  16. Белоусов, А.Б., Белоусова М.Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. / А.Б. Белоусов, М.Г. Белоусова // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 1. – С. 25-40.
  17. Бузевич, А.В. Специализированный аппаратно-программный комплекс сбора и обработки геофизической информации обсерватории "Паратунка" / А.В. Бузевич, С.Э.

- Смирнов, В.И. Филимонов, П.П. Фирстов // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Тезисы докладов международного совещания 18-21 августа 1998 г. – г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 1998. – С. 36-39.
18. Будилов, Д.И. Система наблюдений за параметрами геофизических полей вблизи вулкана Эбеко / Д.И. Будилов, П.П. Фирстов, Р.Р. Акбашев, Е.О. Макаров // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды VII научно-технической конференции 29 сентября – 5 октября 2019 г. – г. Петропавловск-Камчатский – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 17-21.
  19. Блинецов В.Е., Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным / В.Е. Блинецов, С.Л. Сеньюков // Сейсмические приборы. – 2015. Т. – 51. № – 1. С. – 46-59.
  20. Гирина, О.А. Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. по данным KVERT / О.А. Гирина, А.Г. Маневич, Д.В. Мельников, Нуждаев А.А. Демянчу Ю.В. // 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.
  21. Гордеев Е.И. Инфразвуковые волны от извержений вулканов Камчатки / Е.И. Гордеев, П.П. Фирстов, С.Н. Куличков, Е.Р. Махмудов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2013. Т. –49. № – 4. С. –456.
  22. Гордеев Е.И. Вулканы и их опасность для авиации / Е.И. Гордеев, О.А. Гирина // Вестник РАН. – 2014. Т. 84. № 2. С. 134-142. DOI: 10.7868/S0869587314020121.
  23. Гордюк, В.П. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы / В.П. Гордюк // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Ленинград: Гидрометиздат, 1981. – Вып. 442. – С. 96-102.
  24. Горшков, Г.С. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 г. / Г.С. Горшков, Г.Е. Богоявленская. – М.: Наука, 1965. –170 с.
  25. Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. – М.: Наука, 1991. – 302 с.
  26. Дегтерев, А.В., Чибисова М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. / А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова // Геосистемы переходных зон. – 2020. – № 1. – Т. 4. – С. 93–102. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102>.
  27. Дрознин Д.В. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS /Д.В. Дрознин, С.Я. Дрознина // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. –С. 22-34.

28. Дружин Г.И. Аппаратурный комплекс для определения азимутальных углов прихода импульсных ОНЧ излучений / Г.И. Дружин, Д.В. Тарасенко, В.М. Пухов, А.В. Злыгостев // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. Тезисы докладов II международного совещания 14-19 августа 2001 года. г. П.-Камчатский, 2001. С.32-33.
29. 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.
30. Жаринов, Н.А. Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке / Н.А. Жаринов, Ю.В. Демянчук // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 4. – С. 3–13.
31. Имянитов, И.М. Современное состояние исследований атмосферного электричества / И.М. Имянитов, Н.С. Шифрин // Успехи физических наук. – 1962. – Т. LXXVI. Вып. 4. – С. 593-642.
32. Имянитов, И.М. Электричество свободной атмосферы / И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина // Ленинград: Гидрометеиздат, 1965.
33. Климин, Н.Н. Исследования электризации вулканического пепла при взаимодействии его с каплями воды / Н.Н. Климин, О.П. Руленко, И.И. Дьяконова // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 4 – С. 67- 75.
34. Козлов В.И. Аномальное поведение электрического поля атмосферы во время экстремально низких температур / В.И. Козлов, В.Н. Морозов, П.М. Нагорский, К.Н. Пустовалов, А.А. Торопов // Материалы международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы».Изд-во: ИОА СО РАН, г. Томск, 2018.– D210-D213.
35. Козлов В. И. Основные сценарии развития вариаций атмосферно-электрических величин в приземной атмосфере во время сильных морозов на территории Сибири / В. И. Козлов, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов, А. А. Торопов // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2019. – Т. 29. – № 4. – С. 135-148. ISSN 2079-6641. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-135-148.
36. Котенко, Т.А. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) 2016-2017 гг. / Т.А. Котенко, Е.И. Сандиминова, Л.В. Котенко // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2018. – № 1. –В. 37.– С. 32–42.
37. Котенко, Т.А. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2018. / Т.А. Котенко, Е.И. Сандиминова, Л.В. Котенко // Материалы ежегодной конференции, посвящённой

- Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. – С. 187-190.
38. Котенко Т.А. Вулкан Эбеко в 2019 г.: динамика извержения по наземным данным / Т.А. Котенко, С.З. Смирнов, Е.И. Сандимирова // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 3031 марта 2020 г. Петропавловск- Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 38–41.
  39. Мареев, Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи / Е.А. Мареев // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 5. – С. 527- 533.
  40. Меншуткин, Б.Н. Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова / Б.Н. Меншуткин, П.Н. Берков // Изд-во Академии наук СССР, 1947.
  41. Меняйлов, И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко / И.А. Меняйлов, Л.П. Никитина, В.Н. Шапарь // Вулканология и сейсмология. – 1988.– № 4. – С. 21-36.
  42. Нагорский, П.М. Сравнительный анализ медленных вариаций электрического поля на примере эксплозий вулкана Эбеко и внктремассовых кучево-дождевых облаков / П.М. Нагорский, Р.Р. Акбашев, К.Н. Пустовалов, П.П. Фирстов // Материалы Всероссийской конференции "Глобальная электрическая цепь" Геофизическая обсерватория "Борок" филиал института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН - Ярославль: Филигрань, 2021. – С. 69.
  43. Озеров, А.Ю. Извержение вулканов Северной группы в начале XXI века / А.Ю. Озеров, О.А. Гирина, Н.А. Жаринов, А.Б. Белоусов, Ю.В. Демянчук// Вулканология и сейсмология. – 2020. – № 1. – С. 3-9.
  44. Парамонов, Н.А. Широтный ход элементов атмосферного электричества / Н.А. Парамонов // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова. – 1963. – Т. 146. – С. 65-70.
  45. Патент РФ №110469. Датчик электрического поля. Авторы: В.А. Ефимов, П.А.Полушин, Л.В.Грунская. Оп. 20.11.2011., Бюл. №32.
  46. Патент РФ № 124400. Измеритель электрического поля. Авторы: В.А.Ефимов, П.А.Полушин, Л.В.Грунская. Оп. 20.01.13., Бюл.№2.
  47. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса / К.Н. Пустовалов, П.М. Нагорский // Оптика атмосферы и океана. – 2016. –Т.29. –№9. – С. 647-653 DOI: [10.15372/AOO20160805](https://doi.org/10.15372/AOO20160805).

48. Пустовалов К. Н. Отклик в приземном электрическом поле изолированных внутримассовых кучево-дождевых облаков / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // «Распространение радиоволн»: Труды XXV Всероссийской открытой научной конференции (Томск, 4–9 июля 2016 г.). – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – Т. III. – С. 229–232.
49. Раст. Х. Вулканы и вулканизм / Х. Раст // Москва: МИР, 1982. С. – 344.
50. Руленко, О.П. Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков. Автореф. Дис. на соис. уч. ст. к.ф.–м.н. / О.П. Руленко. – СПб., 1994. –16 с.
51. Руленко, О.П. Исследования электризации облаков, создаваемых распылением вулканического пепла / О.П. Руленко, Н.Н. Климин, И.И. Дьяконова, В.Ю. Кириянов // Вулканология и сейсмология. – 1986. – № 5 – С. 17 - 29.
52. Руленко, О.П. Изучение электризации вулканического пепла при распылении его с разных подложек / О.П. Руленко, Н.Н. Климин // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 3 – С. 63- 72.
53. Руленко, О.П. Атмосферно–электрические эффекты Большого трещинного Толбачинского извержения в июле–октябре 1975 г. / О. П. Руленко, П.И. Токарев // Бюллетень вулканологической станции. – 1979. – № 56. – С. 96-102.
54. Руленко, О.П. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г.,  $M=7.0$  / О.П. Руленко, Г.И. Дружин, Е.Ф. Вершинин // Докл. РАН. –1996. – Т. – 348. – № 6. – С. 814–816.
55. Руленко, О.П. Краткосрочный атмосферно – электрический предвестник Камчатского землетрясения 6.03.1992,  $M=6.1$  / О.П. Руленко, А.В. Иванов, А.В. Шумейко // Докл. РАН. –1992. – Т. 326. – № 6. – С. 980-982.
56. Руленко, О.П. Электричество вулканов / О.П. Руленко, П.И. Токарев, П.П. Фирстов // Бюллетень вулканологических станций – 1976. – № 52. – С. 11-17.
57. Рыбин, А.В. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. / А.В. Рыбин, М.В. Чибисова, А.В. Дегтерев // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». – 2017. – № 1. – В. 33. – С. 83–88.
58. Синкевич А.А. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов / А.А. Синькевич, Ю.П. Михайловский, Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, Е.В.Богданов, А.Х. Аджиев, А.М. Малкарова, А.М. Абшаев // Метеорология и гидрология. – 2016. – 9. – С. 27-40.

59. Сенюков, С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. / С.Л. Сенюков // Вулканология и сейсмология – 2013. – № 1. – С.96–108.
60. Смирнов, С.Э. Специализированный программно–аппаратный комплекс геофизической обсерватории «Паратунка» / С.Э. Смирнов // Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока: Сборник докладов школы–семинара, 11–16 августа 2003 г. – с. Паратунка, Камчатская область: ИКИР ДВО РАН, 2013. – С. 8-11.
61. Тверской, П.Н. Суточный ход напряженности электрического поля над континентами / П.Н. тверской // Известия АН СССР. Серия географическая, геофизическая. – 1949. Т. XII. № 6. – С. 488-500.
62. Торопов А.А. Вариации напряженности атмосферного электрического поля во время ближних гроз в Якутске/ А.А.Торопов, В.И. Козлов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIII Международного симпозиума. Иркутск, 3-7 июля 2017 г.: труды. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2017. Е69-Е72.
63. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. О деятельности, магматической питающей системе и глубинном строении Ключевской группы вулканов / С.А. Федотов, Н.А. Жаринов, Л.И. Гонтовая // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. – 24-27.
64. 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.
65. Фирстов, П.П. Начало нового эструзивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. / П.П.Фирстов, В.А. Гаврилов, Е.Д. Жданова, В.Ю. Кирьянов // Вулканология и сейсмология. – 1994. – № 4–5. – С.33-46.
66. 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.
67. 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>.
68. 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.
69. Фирстов П.П., Попов О.Е., Лобачева М.А., Будилов Д.И., Акбашев Р.Р. Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21-22 июня 2019 г. / П.П. Фирстов, О.Е. Попов, М.А. Лобачева, Д.И. Будилов, Р.Р. Акбашев // Геосистемы переходных зон. – 2020. – № 1. – Том. 4. – С. 71-92. DOI: 10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081.082-092.
70. Фирстов, П.П. Комплексные геофизические наблюдения на вулкане Карымском (Камчатка) в августе 2012 г. / П.П. Фирстов, Е.Р. Махмудов, Е.О. Макаров, D. Fi // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр» Серия: Науки о Земле. – 2012. В. – 20. № – 2. С. – 48-58.
71. Френкель, Я.И. Теория явлений атмосферного электричества / Я.И. Френкель // Гостехиздат, 1949.
72. Хабуная, С.А. Извержения вулкана Шивелуч в 1993 г. / С.А. Хабуная, Н.А. Жаринов, Я.Д. Муравьев, В.В. Иванов, Г.Е. Богоявленская, Т.Ю. Новгородцева, Ю.В. Демянчук, В.А. Будников, С.М. Фазлуллин // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 1. – С. 3-16.
73. Чалмерс, Дж.А. Атмосферное электричество / Дж.А. Чалмерс // Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 421 с.
74. Чебров, В.Н. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона / Д.В. Дрознин, С.Я. Дрознина, Н.З. Захарченко, Ю.А. Кугаенко, Д.В. Мельников, В.Н. Мишаткин, Я.Д. Муравьев, И.Н. Нуждина, А.В. Рыбин, С.Л. Сенюков, В.А. Сергеев, С.С. Сероветников, Н.Н. Титков, П.П. Фирстов В.В. Ящук // Сейсмические приборы. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 40-54.
75. Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Фирстов П.П., Бузевич А.В. Базовые модели источников вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля / Н.В. Чернева, Е.А. Пономарев, П.П. Фирстов, А.В. Бузевич // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. П-Камчатский. – 2007. № – 2. Вып.– 10. С. – 60-64.
76. Чернева, Н.В. Формирование локального электрического поля атмосферы на Камчатке под влиянием природных процессов / Н.В. Чернева, П.П. Фирстов // Владивосток: Дальнаука, 2018. – С.127.
77. Чернева Н.В. Идентификация молний с облаками пепла эксплозивных извержений Камчатки / Н.В. Чернева, А.Н. Мельников, Р.Н. Holzworth, А.В. Иванов, Г.И. Дружин, П.П. Фирстов// Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VI

- международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 9-13 сентября 2013 г.: сб. докл. / отв. ред. Б.М. Шевцов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. С. 360-265.
78. Чибисова, М.В. Активность вулканов Курильских островов в 2018 г. / М.В. Чибисова, А.В. Дегтерев // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр» Серия: Науки о Земле. – 2019. – С. 91-98. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-91-98>.
  79. Юрков, А.К. Особенности выделения радона из образцов горных пород при повторном нагреве / А.К. Юрков, И.А. Козлова, С.В. Бирюлин // Уральский геофизический вестник. – 2017. – № 2. – В. 30. – С. 79-82.
  80. Aizawa, K. Physical properties of volcanic lightning: constraints from magnetotelluric and video observations at Sakurajima volcano, Japan / K.Aizawa, C. Cimarelli, M.A.Alatorre-Ibarguenoitia, A.Yokoo, D.B.Dingwell, M.Iguchi // Earth Planet. Sci. Lett. – 2016. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.024>.
  81. Akbashev, R.R. Recording of atmospheric electrical potential gradient in the central part of Kamchatka peninsula / R.R.Akbashev, P.P. Firstov, N.V. Cherneva // E3S Web Conf. – 2018. – V.62. – P.1-8. [doi.org/10.1051/e3sconf/20186202013](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186202013).
  82. 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. doi: 10.1088/1757-899X/698/4/044042.
  83. Alois, S. Contact electrification in aerosolized monodispersed silica microspheres quantified using laser based velocimetry / S. Alois, J. Merrison, J. J. Iversen, J. Sesterhenn // J. Aerosol Sci.– 2017. doi: 10.1016/j.jaerosci.2016.12.003.
  84. Aplin, K. L. Electrostatics and in situ sampling of volcanic plumes / K. L. Aplin, A. J. Bennett, R. G. Harrison, I. M. P. Houghton // Chapter 6 – Volcanic ash: Hazard observation and monitoring. Amsterdam: Elsevier, 2016. PP. – 99-113. ISBN: 978–0–081004050.
  85. Aplin, K. L. Electrical charging of ash in Icelandic volcanic plumes / K.L Aplin,. I.M.P. Houghton, K.A. Nicoll // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A, 2014.
  86. Arason, P. Volcanogenic lightning during the Grímsvötn 2004 subglacial eruption / P. Arason // Geophysical Research Abstracts. – 2007. – V. 7.
  87. Arason, P. Charge mechanism of volcanic lightning revealed during the 2010 eruption of Eyjafjallajökull / P. Arason, A.J. Bennett, L.E. Burgin // Journal of Geophysical Research. – 2011. – V. 116. – B00C03. <https://doi.org/10.1029/2011JB008651>.

88. Anderson, R. Electricity in volcanic clouds / R. Anderson, S. Björnsson, D. Blanchard, S. Gathman, J. Hughes, S. Jonasson, CB. Moore, HJ. Survilas, B. Vonnegut // *Science*. – 1965. – V. 148. Is. 3674. – P. 1179-1189.
89. Belousov, A. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles / A. Belousov, M. Belousova, A. Auer, T.R. Walter, T.A. Kotenko // *Bulletin of Volcanology*. – 2021 – V. 83. Is. 4. – P. 3-24. doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z.
90. Bagheri, G. Timing and nature of volcanic particle clusters based on field and numerical investigations / G. Bagheri, E. Rossi, S. Biass, C. Bonadonna // *J. Volcanol. Geoth. Res.* – 2016. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.09.009.
91. Behnke, S.A. Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano / S.A. Behnke, R.J. Thomas, S.R. McNutt, D.J. Schneider, P.R. Krehbiel, W. Rison, H.E. Edens // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 2013 – V. 259. – P. 214–234.
92. Behnke, S. A. Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano / S. A. Behnke, R. J. Thomas, S. R. McNutt, D. J. Schneider, P. R. Krehbiel, W. Rison, and H. E. Edens // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 2013. P. 214 – 234, doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.12.010.
93. Behnke, S.A. The 2010 eruption of Eyjafjallajökull: Lightning and plume charge structure / S.A. Behnke, R.J. Thomas, H.E. Edens, P.R. Krehbiel, W. Rison // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2014 – 119. P. 833–859. doi:10.1002/2013JD020781.
94. Behnke, S. Changes to the turbulent kinematics of a volcanic plume inferred from lightning data: Plume turbulence and lightning / S. Behnke, E. Bruning // *Geophysical Research Letters*. – 2015. doi: 10.1002/2015GL064199.
95. Behnke, S. Investigating the origin of continual radio frequency impulses during explosive volcanic eruptions / S. Behnke, H. Edens, R. Thomas, C. Smith, S. McNutt, A. Van Eaton, V. Cigala // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. doi: 10.1002/2017JD027990.
96. Bennett, A.J. Monitoring of lightning from the April–May 2010 Eyjafjallajökull volcanic eruption using a very low frequency lightning location network / A.J. Bennett, P. Odams, D. Edwards, P. Arasone // *Environ. Res. Lett.* – 2010 – V. 5. – 044013. doi 10.1088/1748-9326/5/4/044013
97. Büttner, R. Short-time electrical effects during volcanic eruption: Experiments and field measurements / R. Büttner, B. Zimanowski, H. Röder // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – V. 105. Is. B2. – P. 2819-2827.

98. Brook, M. Lightning in volcanic clouds / M. Brook, C.B. Moore, T. Sigurgeirsson // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – V. 79. Is. 3. – P. 425-428.
99. Brown, R.J. A review of volcanic ash aggregation / R.J. Brown, C. Bonadonna, A.J. Durant // *Phys. Chem. Earth*. – 2012. doi:10.1016/j.pce.2011.11.00.
100. Cimorelli, C. Experimental generation of volcanic lightning / C. Cimorelli, M.A. Alatorre-IbargüenGoitia, U. Kueppers, B. Scheu, D.B. Dingwell // *Geology* – 2014. – V. 42(1). – P. 79–82. doi:10.1130/G34802.1.
101. Cimorelli C. Multiparametric observation of volcanic lightning: Sakurajima volcano, Japan / C. Cimorelli, M.A. Alatorre IbargüenGoitia, K. Aizawa, A. Yokoo, D.B. Dingwell // *Geophysical Research Letters* – 2016. doi: 10.1002/2015GL067445.
102. Dhanorkar, S. Calculation of electrical conductivity from ion-aerosol balance equations / S. Dhanorkar, A. K. Kamra // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 1997. doi:10.1029/97JD02677.
103. Dye, J. E. Observations within two regions of charge during initial thunderstorm electrification / J.E. Dye, J.J. Jones, A.J. Weinheimer, W.P. Winn // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 1988. – V. 114(483). – P. 1271–1290. doi:10.1002/qj.49711448306.
104. Duff, N. Particle dynamics simulations of triboelectric charging in granular insulator systems / N. Duff, D. J. Lacks // *J. Phys.: Conf. Ser.* 142 – 2008. – P. 51–57. doi:10.1088/1742-6596/142/1/012078.
105. Durant, A. J. Toward a realistic formulation of fine-ash lifetime in volcanic clouds / A. J. Durant // *Geology*. – 2015. doi:10.1130/focus032015.1.
106. Esposito, F. The role of the atmospheric electric field in the dust-lifting process / F. Esposito, R. Molinaro, C. I. Popa, C. Molfese, F. Cozzolino, L. Marty, K. Taj-Eddine, G. Di Achille, G. Franzese, S. Silvestro, G. G. Ori // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – V. 43. – Is. – 10. <https://doi.org/10.1002/2016GL068463>.
107. Forward, K. M. Particle-size dependent bipolar charging of Martian regolith simulant / K.M. Forward, D.J. Lacks, R.M. Sankaran // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – V. 36. – Is. 13. doi:10.1029/2009GL038589.
108. Firstov, P.P. Atmospheric electrical effects during a strong explosive eruption of Bezymyanniy 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.
109. 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. <http://doi.org/10.3390/atmos11060634>.
110. Firstov, P.P. Natural factor impact on atmospheric electric field variations in Kamchatka / P.P. Firstov, N.V. Cherneva, R.R. Akbashev // *E3S Web Conf.* – 2017. – V. 62. – P. 1-7. [doi.org/10.1051/e3sconf/20172001003](http://doi.org/10.1051/e3sconf/20172001003).
111. Firstov, P.P. Atmospheric-electric effects from volcano eruptions on Kamchatka peninsula (Russia) / P.P. Firstov, N.V. Cherneva, R.R. Akbashev, E.I. Malkin, G.I. Druzhin // *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2019*. 1120874. [doi.org/10.1117/12.2540356](http://doi.org/10.1117/12.2540356).
112. Gilbert, J. S. Charge measurements on particle fallout from a volcanic plume / J.S. Gilbert, S.J. Lane, R.S.J. Sparks, T. Koyaguchi // *Nature*. – 1991. 349(6310). – P. 598–600. [doi:10.1038/349598a0](http://doi.org/10.1038/349598a0).
113. Girina O.A. Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010 / O.A. Girina // *J. Volcanol. Geother. Res.* – 2013. – V. 263. – P. 22-41. [doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002](http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002).
114. Girina O.A. 2018 Bezymianny volcano eruption on December 20/ O.A. Girina, E.A. Loupian, D.V. Melnikov, A.G. Manevich, A.A. Sorokin, L.S. Kramareva, I.A. Uvarov, A.V. Kashnitskiy // *Current problems in remote sensing of the Earth from Space*. – 2018. P. 3 88–99.
115. Gorshkov, G.S. Kurile Islands. Catalog of Active Volcanoes of the World and Solfatara Fields / G.S. Gorshkov // Rome, IAVCEI, 1958. Pt. – 7. – P. – 1-99.
116. Gringek, W. Electric structure from 0 at 30 kilometers / W. Gringel, Rosen J.M., Hofmann D.J. // *Studies in Geophysics, the Earth's Electrical Environment*. National Academy Press. – 1986. – P. 166-182.
117. Harrison, R.G. Ion-Aerosol-Cloud Processes in the Lower Atmosphere / R.G. Harrison, K. S. Carslaw // *Reviews of Geophysics*. – 2013. V. – 41. [doi.org/10.1029/2002RG000114](http://doi.org/10.1029/2002RG000114)
118. Harrison, R. G. Self-charging of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume / R.G. Harrison, K.A. Nicoll, Z. Ulanowski, T.A. Mather // *Environ. Res. Lett.* – 2010. – V. 5. – N. 2. [doi:10.1088/1748-9326/5/2/024004](http://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/024004).
119. Hatakeyama H. On the variation of the atmospheric potential gradient caused by the cloud of smoke of the volcano Asama / H. Hatakeyama / *The second report: Journal of the Meteorological Society of Japan*. – 1943. – V. 21. – P. 420-426.
120. Hatakeyama, H. On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the smoke–cloud of the volcano Yakeyama / H. Hatakeyama // *J. Geomagn. Geoelect.* – 1949, Kyoto 1,48-51.

121. Hatakeyama H. On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the eruption–smoke of the volcano Aso / H. Hatakeyama, Uchikawa K. // *Pap Meteor Geophys.* – 1951. – V. 2. – P. 85-89. DOI: 10.2467/mripapers1950.2.1 85
122. Hutchins, M.L. Far field power of lightning strokes as measured by the World-Wide Lightning Location Network / M.L. Hutchins, R. H. Holzworth, C. J. Rodger and J. B. Brundell // *J. A. O. Tech.* – 2012. – V.29. – P. 1102-1110.
123. Herzog, M. The effect of phase changes of water on the development of volcanic plumes / M. Herzog, H.F. Graf, C. Textor, J.M. Oberhuber // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 1998. – V. 87(1–4). – P. 55–74. doi:10.1016/S0377-0273(98)00100-0.
124. Houghton, I. M. P. Triboelectric charging of volcanic ash from the 2011 Grímsvötn eruption. / I.M.P. Houghton, K.L. Aplin, K.A. Nicoll // *Physical Review Letters.* – 2013. – *111*(11), 118501. doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.118501.
125. James M.R. Volcanic plume monitoring using atmospheric electrical potential gradient / M.R. James, S.J. Lane, J.S. Gilbert // *J. Geol. Soc. London.* – 1998. – N 155. – P. 587-590.
126. James, M. R. Volcanic plume electrification – Experimental investigation of fracture charging mechanism / M. R. James, S. J. Lane, J. S. Gilbert // *J. Geophys. Res* – 2000. – V. 105 N B7. – P. 641–649. doi.org/10.1029/2000JB900068
127. James, M.R. Density, construction, and drag coefficient of electrostatic volcanic ash aggregates / M.R. James, S.J. Lane, J.S. Gilbert // *J. Geophys. Res* – 2003. – V. 108. – N B9. – P. 24–35.
128. James, M.R. Electrical charging of volcanic plumes / M.R. James, L. Wilson, S.J. Lane, J.S. Gilbert, T.A. Mather, R.G. Harrison, R.S. Martin // in *Planetary Atmospheric Electricity.* – 2008 – P. 399–418. Springer, New York.
129. Kikuchi K. Atmospheric electrical properties of volcanic ash particles in the eruption of Mt. Usu volcano, 1977 / K. Kikuchi, T. Endoh // *The second report: Journal of the Meteorological Society of Japan.* – 1982. – V. 60. – P. 548-561.
130. Lacks, D. J. Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems / D.J. Lacks, A. Levandovsky // *Journal of Electrostatics.* – 2007. – V.65. *Es.* – 2. P – 107–112. DOI.org/10.1016/j.elstat.2006.07.010.
131. Lane S.J. Electric potential gradient changes during explosive activity at Sakurajima volcano, Japan / S.J. Lane, J.S. Gilbert // *Bulletin of Volcanology* – 1992. – V. 54. – P. 590-594.
132. Lane, S.J. Electrostatic phenomena in volcanic eruptions / S.J. Lane, M.R. James, J.S. Gilbert // *J. Phys.* – 2011. Conference Ser. 301 012004. – P. 1–4.
133. Lane S.J. Electrical and chemical properties of eruption plumes at Sakurajima volcano, Japan / S.J. Lane, J.S. Gilbert, A.J. Kemp // *Bull. in 8th Report of Geophysical and Geochemical*

- Observations at Sakurajima Volcano – Obs., Kyoto Univ., Kyoto, Japan. – 1995. – P. 105-127.
134. Lemonnier, L.G. Observationssurl'electricitedel'air / L.G. Lemonnier // Mem.Acad.Sci. 2. – 1752. P. 233.
  135. Lynch, J.S. Fire and Mud: Eruptions and Lahars on Mount Pinatubo, Philippines / J.S. Lynch, G. Stephens, // University of Washington Press, Seattle, – 1996.
  136. Malkin, E.I. Dirty thunderstorms caused by volcano explosive eruptions in Kamchatka by the data of electromagnetic radiation / E.I. Malkin, N.V. Cherneva, P.P. Firstov, G.I. Druzhin, D.V. Sannikov // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2021. 946, 012015, DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012015
  137. McNutt, S.R. Volcanic lightning: global observations and constraints on source mechanisms / S.R. McNutt, E.R. Williams // Bull Volcanol. – 2010. – V. 72. – N 10. – P. 1153–1167.
  138. Mallios, S.A. Charge transfer to the ionosphere and to the ground during thunderstorms / S.A. Mallios, V.P. Pasko // Journal of Geophysical Research. – 2012. – V. 117. Is. A8. – P. 1-16.
  139. Markson, R. The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years / R. Markson // Bull. Am. Met. Soc. – 2007. – P. 223-241
  140. Markson, R. Global scale comparison of simultaneous ionospheric potential measurements / R Markson, Lothar Ruhnke, E. R Williams // Atmospheric Research. – 1999. DOI:10.1016/S0169-8095(99)00016-2.
  141. Mather T.A. Electrification of volcanic plumes / T.A. Mather, R.G. Harrison // Surveys in Geophysics. – 2006. – V. 27. – P. 387-432.
  142. Mauchly, S.J. Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie, 1915–1921 / S.J. Mauchly // Researches of the Department of Terrestrial Magnetism, V. V. – Washington: Carnegie Institution, Publ. No. 175. – 1926. – P. 385-424.
  143. Méndez Harper, J. The effects of dynamics on the triboelectrification of volcanic ash / J. MéndezHarper, J. Dufek // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2016. – V.121. – P. 8209–8228. doi.org/10.1002/2015JD024275.
  144. Méndez Harper, J. The electrification of volcanic particles during the brittle fragmentation of the magma column / J. Méndez Harper, J. Dufek // Proc. 2015 Electrostat. Soc. Am. Meet.
  145. Mendez Harper, J. Charge injection into the atmosphere by explosive volcanic eruptions through triboelectrification and fragmentation charging. Earth and Planetary Science / J. Mendez Harper, C. Cimarelli, V. Cigala, U. Kueppers, J. Dufek // G.Letters, 574, 117162. – 2021. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117162 631.

146. Meng Z. Volcanoes and Climate: Sizing up the Impact of the Recent Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption from a Historical Perspective / Z. Meng, Z. Tianjun, M. Wenmin, C. Xiaolong, L. Jian, L. Fei, G. Chaochao // *Advances in atmospheric sciences*. – 2022. – DOI: 10.1007/s00376-022-2034-1.
147. Miura T. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima volcano Japan / T. Miura, T. Koyaguchi, Y. Tanaka // *Bulletin of Volcanology*. – 2002.V. N 64. – P. 75-93.
148. Mueller S.B. Ash aggregation enhanced by deposition and redistribution of salt on volcanic ash surfaces in eruption plumes / S.B. Mueller, P.M. Ayris, F.B. Wadsworth, U. Kueppers, A.S. Casas, P. Delmelle, M. Jacob, J. Taddeucci, D.B. Dingwell // *Sci Rep*. – 2017. 7:45762.
149. Nagata T. The change in point-discharge current due to the volcanic smoke of Sakura-jima / T. Nagata, K. Hirao, M. Fukushima, T. Takahashi // *Bull. Earthq. Res. Inst.* – 1946. – Vol. 24. – P. 221-227.
150. Nicoll, K., Airey, M. Cimarelli C., Bennett, A.; Harrison, G., Gaudin, D., Aplin, K., Koh, K. L., Knuever, M., Marlton, G. First In Situ Observations of Gaseous Volcanic Plume Electrification / K. Nicoll, M. Airey, C. Cimarelli, A. Bennett, G. Harrison, D. Gaudin, K. Aplin, K. L. Koh, M. Knuever, G. Marlton // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – V. 46. – Is. 6. – P. 3532-3539. doi: 10.1029/2019GL082211.
151. Pliny, T. Y. *The Letters of the Younger Pliny*, edited by B. Radice / T.Y. Pliny // *Penguin Classics*, U. K., 1963.
152. Pollastri, S. Modelling the effect of electrification on volcanic ash aggregation / S. Pollastri, E. Rossi, C. Bonadonna, J. Merrison // *Frontiers in Earth Science*. – 2021, 8, 574106. doi: 10.3389/feart.2020.574106.
153. Robel, R.G. *The global atmospheric electrical circuit* / R.G. Robel, I. Tzur // *Studies in Geophysics, the Earth's Electrical Environment*. National Academy Press, 1986. – P. 224-227.
154. Rose W.I. Ice in the 1994 Rabaul eruption cloud: implications for volcano hazard and atmospheric effects / W.I. Rose, D.J. Delene, D.J. Schneider, G.J.S. Bluth, A.J. Krueger, I. Sprod, C. McKee, H.L. Davies & G.G.J. Ernst. // *Nature*. – 1995. – V. 375. – P. 477-479.
155. 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.
156. Sparks R.S.J. *Volcanic Plumes* / R.S.J. Sparks, M.I. Burski, S.N. Carey, J.S. Gilbert, L.S. Glaze, H. Sigurdsson, A.W. Woods // *John Wiley & Sons*, Chichester. – 1997. – 235 p.

157. Smith, C.M. Correlating the electrification of volcanic plumes with ash fall textures at Sakurajima Volcano, Japan / C.M. Smith, A.R. VanEaton, S. Charbonnier, S.R. McNutt, S.A. Behnke, R.J. Thomas, H.E. Edens, G. Thompson // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2018. – 492 – P. 47–5 doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.052
158. Tanakadate, H. Volcanic activity in Japan during the period between July 1934 and October 1935 / H. Tanakadate. // *Japanese J Astr Geophys*. – 1936. – Vok. 13. – P. 121.
159. Taddeucci, J . Aggregation-dominated ash settling from the Eyjafjallajökull volcanic cloud illuminated by field and laboratory high-speed imaging / J. Taddeucci, P. Scarlat, C.Montanaro, C. Cimarelli, E. Del Bello, C. Freda // *Geology*. – 2011. P. – 891–894. doi:10.1130/G32016.1.
160. Thomas, R. J. Lightning and Electrical Activity during the 2006 Eruption of Augustine Volcano / R. J. Thomas, P. Krehbiel, W. Rison, H. Edens, G. Aulich, W. P. Winn, S. R. McNutt, G. Tytgat, E. Clark // *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska*. U.S. Geological Survey. Ch. 25. – 2007. – P. 579–608.
161. Van Eaton A.R. Ascent dynamics of large phreatomagmatic eruption clouds: The role of microphysics / A.R. Van Eaton, M. Herzog, C.J.N. Wilson, J. McGregor // *Journal of Geophysical Research Atmospheres (J GEOPHYS RES)*. – 2012. 117:B03203
162. Van Eaton A.R. Did ice-charging generate volcanic lightning during the 2016–2017 eruption of Bogoslof volcano, Alaska? / A.R. Van Eaton, D. J. Schneider, C. M. Smith, M. M. Haney, J. J. Lyons, R. Said, D. Fee, R. H. Holzworth, L. G. Mastin // *Bulletin of Volcanology*. – 2020. V.– 82. DOI:10.1007/s00445-019-1350-5.
163. Walter, T.R. The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations / T.R. Walter, A. Belousov, M. Belousova, T. Kotenko, A. Auer // *Remote Sens* 12, 1961. – 2020. – <https://doi.org/10.3390/rs12121961>.
164. Williams, E.R. The global electrical circuit: A review / E.R. Williams // *Atmospheric Research*. – 2009. – V. 91. – P. 140-152.
165. Williams, E. R. Total water contents in volcanic eruption clouds and implications for electrification and lightning / E.R. Williams, S.R. McNutt // *Recent progress in lightning physics*. Kerala: Research Signpost. – 2005. – P 81–94.
166. Wilson, C.T.R. Investigation on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms / C.T.R. Wilson // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.*, 1920. – V. A221. – P. 73-115.

167. Wilson L. Volcanic explosion clouds: Density, temperature, and particle content estimates from cloud motion / L. Wilson, S. Self, *Journal of Geophysical Research Soiled Earth.* – 1980. V. 85. Is. B5. – P. 2567-2572.