

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ЭКСПЛОЗИИ

© 2019 г. П. П. Фирстов^{1, *}, Р. Р. Акбашев¹, Н. А. Жаринов²,
А. П. Максимов², Т. М. Маневич², Д. В. Мельников²

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба РАН”

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

*e-mail: firstov@emsd.ru

Поступила в редакцию 05.07.2018 г.

Показано, что количество взрывных извержений вулкана Шивелуч в последние годы значительно увеличилось, что повышает важность мониторинга состояния вулкана всеми доступными средствами. С целью внедрения в комплексный метод мониторинга взрывных извержений еще одной методики, анализируются отклики в напряженности вертикальной компоненты электрического поля атмосферы (E_z ЭПА) при прохождении взрывных облаков. Рассмотрены два извержения вулкана Шивелуч различной силы, произошедших 16.12.2016 г. и 14.06.2017 г. С целью селекции сигналов в поле E_z ЭПА использовались данные комплексных наблюдений: спутникового, сейсмического и инфразвукового. В ближней зоне (< 50 км) для обоих извержений одновременно с началом выпадения пепла в динамике E_z ЭПА зарегистрированы сигналы отрицательной полярности. В первом случае пепло-воздушное облако было “сухое”, поэтому сформировалась аэроэлектрическая структура типа “отрицательно заряженное облако”. Сильной взрывной во втором случае в атмосферу было выброшено большое количество пепла и вулканических газов, в которых 98% пришлось на водяной пар, в результате чего в ближней зоне за счет эоловой дифференциации сформировалась дипольная аэроэлектрическая структура. В дальней зоне (> 100 км) от этой взрывной зарегистрирован сигнал положительной полярности от аэроэлектрической структуры типа “положительно заряженное облако” от аэрозольного шлейфа.

Ключевые слова: вулканическое извержение, пепловое облако, электрическое поле атмосферы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019349-62>

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле атмосферы (ЭПА) является чутким индикатором высокоэнергетических процессов, происходящих как в атмосфере, так и в литосфере. Вариации параметров ЭПА ограничиваются не только облачными структурами и грозовыми разрядами, которые, в основном, формируют глобальную электрическую цепь [Мареев, 2010], но известны также и другие связи локального электрического поля атмосферы с геодинамическими процессами (землетрясения, извержения вулканов) [Пономарев и др., 2011].

Долговременные непрерывные наблюдения за градиентом потенциала электрического поля в приземном слое атмосферы, который определяет напряженность вертикальной компоненты электрического поля атмосферы (E_z ЭПА), являются экспериментальной основой для ис-

следований локальных электрических эффектов в атмосфере. Взрывная активность вулканов Камчатки, при которой в атмосферу выбрасывается вулканический пепел, образующий взрывные облака, является еще одним локальным источником аэроэлектрических структур.

Вулканические шлейфы, простирающиеся в некоторых случаях на сотни километров, несут мощный электрический заряд, который может регистрироваться приборами наземного базирования. Контролируя E_z ЭПА в приземном слое, можно обнаруживать присутствие взрывных облаков, даже слабонасыщенных аэрозольными частицами мелкодисперсного пепла [Mather, Harrison, 2006].

На полуострове Камчатка Северная группа вулканов является уникальным объектом для изучения электризации взрывных облаков (рис. 1).

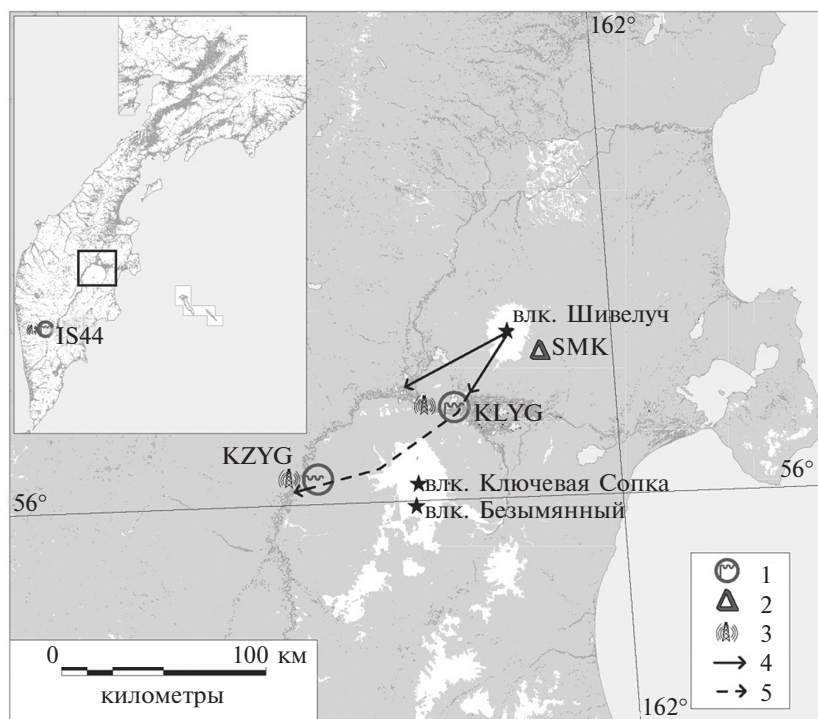


Рис. 1. Схема расположения пунктов регистрации напряженности ЭПА и инфразвуковых волн в районе Северной группы вулканов и трассы эруптивных облаков от двух извержений вулкана Шивелуч, имеющих отклик в EZ ЭПА. Пункты размещения приборов: 1 – флюксметр, 2 – радиотелеметрическая сейсмическая станция, 3 – микробарограф; 4, 5 – траектории эруптивных образований при извержениях (4 – 16.12.2016 г., 5 – 4.06.2017 г.). На врезке показано расположение Северной группы вулканов на Камчатке и инфразвуковой станции IS44.

Частые эксплозивные извержения андезитовых вулканов Шивелуч и Безымянный, при соответствующих направлениях ветра, повышают вероятность прохождения эруптивных шлейфов над поселками Ключи и Козыревск, где установлены флюксметры (KZYG и KLYG, см. рис. 1). Первые результаты, полученные по данным с этих пунктов, приведены в работах [Акбашев, Фирстов, 2017; Фирстов и др., 2017; Shevtsov et al., 2016; Firstov et al., 2017]. В данной статье дано описание вариаций E_z ЭПА в пунктах KZYG и KLYG при прохождении эруптивных облаков, возникающих при извержениях вулкана Шивелуч разного генезиса.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

Самый северный действующий андезитовый вулкан Камчатки Шивелуч представляет собой сильно разрушенное вулканическое сооружение возрастом ~60–70 тыс. лет с основанием 45×40 км и площадью не менее 1300 км^2 . Абсолютная высота главной вершины 3283^1 м над уровнем моря (н.у.м.) Современная постройка включает

три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч [Действующие вулканы ..., 1991].

Для последних 10 тыс. лет исторического времени для вулкана Шивелуч были характерны, преимущественно, два типа извержений: катастрофические эксплозивные извержения типа “направленных взрывов” и более слабые извержения, сопровождающиеся ростом экстрезивных куполов.

Последнее катастрофическое извержение произошло 12.11.1964 г., в результате которого отмечено разрушение нескольких куполов с образованием кратера сложной формы размером 1.5×3.0 км и поля резургентных отложений “направленного взрыва” объемом $\sim 1.5 \text{ км}^3$. Вслед за этим началась плининская деятельность, в результате которой было выброшено 0.3 км^3 пепла и извергнуты пирокластические потоки объемом $0.3\text{--}0.5 \text{ км}^3$ [Горшков, Дубик, 1969; Белоусов, Белоусова, 1995].

После 16-летнего перерыва в активности вулкана, с августа 1980 г. по настоящее время с небольшими перерывами в пределах вновь образованного кратера происходит рост экстрезивного купола, сопровождаемый эксплозивными извержениями. Регулярные наблюдения за его формированием показали, что скорость

¹ Здесь и далее по тексту высота дается над уровнем моря.

роста и расход лавы непостоянны во времени. С 1980 г. по настоящее время выделяются три этапа в формировании экструзивного купола [Жаринов, Демянчук, 2013].

На первом этапе (август 1980 г. — конец 1981 г.) началось формирование экструзии. Появление первой порции лавы в виде выжимания отдельных блоков в центральной части кратера не предвлялось и не сопровождалось ни сейсмической, ни вулканической активностью. Формирование купола сопровождалось разрушением отдельных его блоков с образованием раскаленных лавин и небольших пирокластических потоков. В этот период рост купола происходил со средней скоростью 0.8 м/сутки, и к концу 1981 г. относительная высота купола достигла 135 м.

На втором этапе (апрель 1993 — январь 1995 г.) после мощного эксплозивного извержения в апреле 1993 г. [Жаринов и др., 1995; Жаринов, Демянчук 2008; Фирстов и др., 1994; Хубуная и др., 1995] началась экструзивно-эксплозивная деятельность, сопровождавшаяся выжиманием новых экструзий на вершине центрального купола и отдельными эксплозиями различной мощности. В некоторых случаях эруптивное облако поднималось до высот тропопавы (10–12 км), а пепловый шлейф распространялся на сотни километров.

Во время третьего этапа, с 7 мая 2001 г. по настоящее время с помощью цифровой видеосъемки проводился мониторинг роста экструзив-

ного купола, и отмечалось количество выбросов (рис. 2). На основании полученных данных изучалась динамика изменения профиля экструзивного купола, и делались оценки объема и расхода изверженных продуктов [Жаринов, Демянчук, 2013].

После нескольких лет затишья, 7 мая 2001 г. началась сейсмическая активизация, сопровождавшаяся серией пепловых выбросов и интенсивным ростом экструзивного купола, который с мая по октябрь 2001 г. вырос почти на 200 м (см. рис. 2а).

В дальнейшем к экструзивно-эксплозивной деятельности добавилась слабая эффузивная с выжиманием коротких вязких лавовых потоков (см. рис. 2а). Мощные эксплозивные извержения с частичным разрушением экструзивного купола произошли 27.02.2005 г. и 28.10.2010 г. В течение двух лет после извержения 27.02.2005 г. количество пепловых выбросов происходило не более 3–4 в год. В 2007 г. наблюдалось образование лавовой короны на вершине купола, и появились вязкие лавовые потоки, что свидетельствует об уменьшении газонасыщенности магмы.

В 2008 г. продолжалось спокойное выжимание лавовых потоков с эксплозивными извержениями до 6 в год. Усиление эксплозивной деятельности до 20 эксплозий в год и рост купола отмечались в 2009–2010 гг. (см. рис. 2б). Мощное эксплозивное извержение, сопровождавшееся разрушением восточной стороны купола, произошло 28 октября 2010 г.

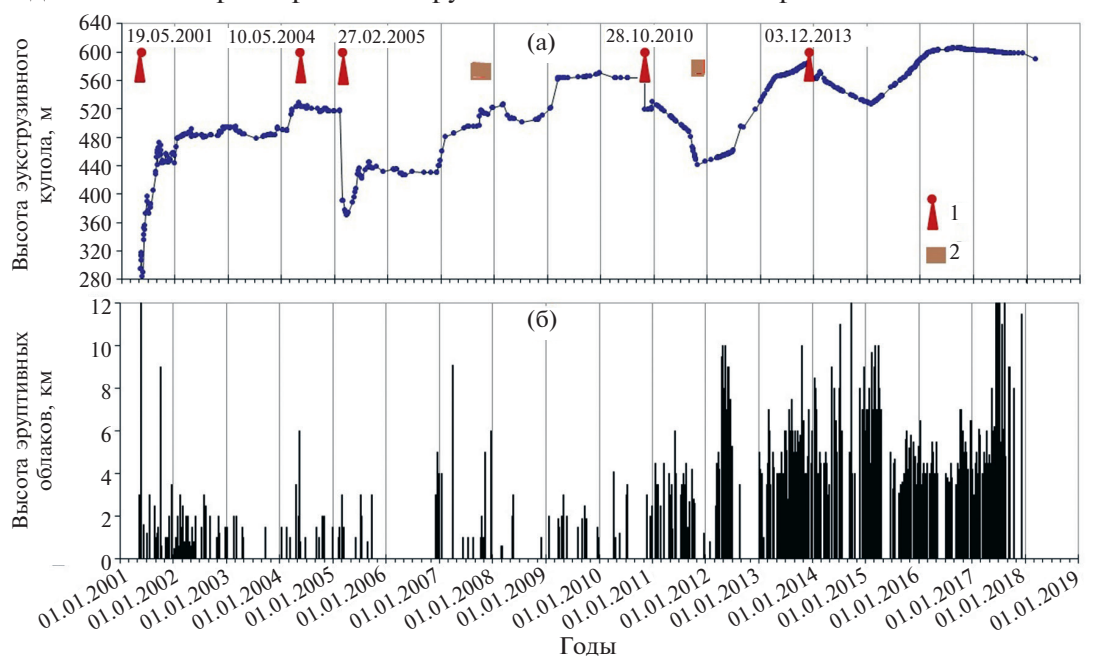


Рис. 2. Динамика экструзивно-эксплозивного извержения вулкана Шивелуч в 2001–2017 гг.

(а) — максимальная высота лавового купола вулкана по данным теодолитных наблюдений из поселка Ключи; (б) — высота парогазовых и пепловых выбросов.

1 — сильные эксплозивные извержения, после которых происходило уменьшение высоты купола или его частичное разрушение; 2 — периоды излияния вязких лавовых потоков на склоны лавового купола.

Рост экструзивного купола с последующим его частичным разрушением во время сильных эксплозивных извержений характерен для вулканов, извергающих роговообманковые андезиты. Это обусловлено высокой вязкостью и газонасыщенностью роговообманковой андезитовой магмы. Высокая вязкость магмы сдерживает дегазацию остаточного расплава, растягивая ее во времени, и, то же время, приводит к образованию мощной жесткой лавовой пробки, запечатывающей вулканический канал, тем самым препятствуя свободному выделению газовой фазы из магмы в атмосферу. В результате возрастает давление выделяющихся из магмы летучих газов, которые являются движущей силой экструзивного процесса, приводящей к мощным эксплозиям. При этом происходит разрушение части купола. Жесткость экструзивного купола и давление скопившихся в магме газов вызывает высокую дисперсность продуктов эксплозий со значительной долей частиц пылевой размерности. В дальнейшем, поскольку вулканический канал остается заполненный магмой, процесс повторяется.

В последующие годы также происходило увеличение количества эксплозий с 37 в 2011 г. до 70 в 2016 г., но резких скачкообразных уменьшений высоты купола не наблюдалось. В 2016–2017 гг. высота экструзивного купола стабилизировалась на высоте примерно 600 м от его основания. По-видимому, это предельная его высота, так как стали наблюдаться раскаленные лавины, а отдельные эксплозии сопровождались обвалами. На взгляд авторов, эти два процесса компенсировали дальнейший рост купола за счет выжимания экструзии.

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

Вопросами электризации эруптивных облаков при извержениях вулканов занимались многие исследователи. В самых ранних работах [Hatakeyama, 1949; Hatakeyama, Uchikawa, 1951], посвященных электризации вулканических облаков, показано, что частицы вулканического пепла при извержении получают значительный, как положительный, так и отрицательный заряд, при этом E_Z ЭПА могла достигать значительных величин. Так на удалении 250 км от вулкана Аки-Яке-Яма (Япония) она составила 1.2 кВ/м.

Натурные наблюдения, выполненные на Большом трещинном Толбачинском извержении (БТТИ) в июле–октябре 1975 г. (Камчатка) [Руленко, 1994; Руленко, Токарев, 1979], а также на вулкане Сакурадзима (Япония) во время его извержения в 1995 г. [James et al., 1998; Miura et al., 2002], позволили дать описание конфигурации зарядов в эруптивном облаке (рис. 3а, 3б). Причем значения E_Z ЭПА могли меняться как по знаку, так и величине. Во время БТТИ максимальные/минимальные значения E_Z ЭПА достигали предела измерительной установки ± 30 кВ/м [Руленко, 1994].

В работах [Руленко, 1994; Miura et al., 2002; Mather, Harrison, 2006] показано, что большую роль на первом этапе в электризации эруптивных облаков имеет процесс фрагментации (разрушения) магмы. На втором этапе происходит разделение частиц разных размеров в эруптивной колонне и в образующемся затем эруптивном шлейфе. Это приводит к их разнополярному

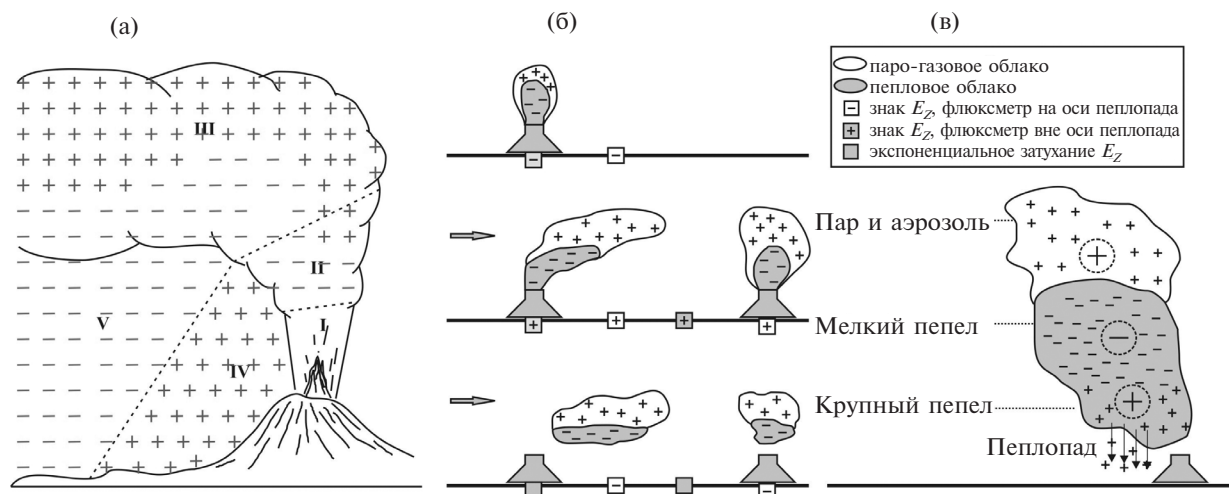


Рис. 3. Схематические модели формирования электрических структур в эруптивном облаке.

(а) — в ближней зоне [Руленко, 1994]; (б) — схемы разделения заряда при формировании вулканического шлейфа под действием ветра, согласно [Miura et al., 2002]; в — разделение зарядов в эруптивных облаках на основе натурных наблюдений на вулкане Сакурадзима, по [James et al., 1998].

I — разделение зарядов под действием гравитационных сил на начальном участке при слабом ветре; II — формирование облака на автономном участке под действием ветра; III — шлейф в зоне плавучести; IV — область выпадения крупной фракции; V — область выпадения тифры.

зарядению и пространственному разделению зарядов в эруптивной колонне и в области пеплопада под шлейфом эруптивного облака. В первом случае разделение обусловлено газодинамическим сопротивлением при инъекции газо-пепловой струи в атмосферу, а во втором — в результате гравитационной дифференциации. Не исключено, что большой вклад среди множества физических и физико-химических процессов возникновения и разделения зарядов в вулканическом облаке вносят термоэлектронная эмиссия и термоэлектричество [Адамчук, Титов, 1984].

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. 3в).

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация E_Z ЭПА в центральной части полуострова Камчатка представляет особый интерес. Здесь располагается Северная группа вулканов, включающая четыре действующих вулкана: Шивелуч, Ключевской — самый высокий (4750 м) и продуктивный вулкан в Евразии, Безымянный и Плоский Толбачик (см. рис. 1). Вблизи Северной группы вулканов на сейсмических станциях Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) в пунктах “Ключи” (KLYG) и “Козыревск” (KZYG) осуществляется регистрация E_Z АЭП с помощью электростатических флюксметра ЭФ-1 и ЭФ-4. Данные с этих пунктов позволяют, наряду с традиционными задачами атмосферного электричества (изучение унитарной вариации, механизмы ГЭЦ и т.д.), изучать атмосферно-электрические эффекты, возникающие при формировании и распространении пепло-газовых облаков от эксплозивных извержений вулканов.

Технические характеристики электростатического флюксметра ЭФ-4 конструкции В.А. Ефимова приведены в табл. 1 [Ефимов и др., 2013]. Следует отметить, что флюксметр ЭФ-1 (прототип ЭФ-4) имеет больший динамический диапазон ± 6 кВ/м. Применение мощного малогабаритного вентильного двигателя и поверхностный монтаж позволили реализовать устройство в прямоугольном корпусе с габаритными размерами 120×200×45 мм. Прибор обладает низким электропотреблением, что очень важно для создания автономной сети пунктов регистрации E_Z АЭП с целью мониторинга эксплозивной активности вулканов Камчатки. С целью защиты механической части приборов

от плотного и очень мокрого снега (“ледяной дождь”) и вулканического пепла, они устанавливаются обтюратором вниз. Флюксметр ЭФ-1 с расширенным диапазоном измеряемой E_Z АЭП работает на полуострове Камчатка с марта 2008 г. За этот период эксплуатации датчик зарекомендовал себя как очень надежный прибор [Ефимов и др., 2013].

Селекция сигналов в записях E_Z ЭПА от эруптивных облаков выполнялась на основании комплексирования данных сейсмического, инфразвукового и спутникового мониторингов активности вулканов Камчатки. В районе вулкана Шивелуч работает сеть радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС) КФ ФИЦ ЕГС РАН — “Сорокина” (SRK), “Семкорок” (SMK), “Байдарная” (BDR). В районе Северной группы вулканов на двух сейсмических станциях работают каналы (KLYA, KZYA), регистрирующие инфразвук в диапазоне частот 0.03–10 Гц [Махмудов и др., 2016], а также ведутся видеонаблюдения. Кроме того, на расстоянии 458 км от вулкана находится международная инфразвуковая станция IS44 (см. рис. 1, врезка), где регистрация инфразвуковых колебаний в диапазоне 0.003–10 Гц осуществляется антенной из 4 микробарографов, позволяющей определять азимут на источник.

Обработка цифровых данных, получаемых с РТСС и инфразвуковых каналов, осуществлялась интерактивной программой DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010].

Таблица 1. Технические характеристики электростатического флюксметра ЭФ-4

Диапазон измеряемой напряженности поля	\pm
Верхняя граничная частота	5 Гц
Выходное сопротивление	2 кОм
Выходное напряжение	\pm
Среднеквадратичная погрешность измерений	5 мВ
Напряжение питания (постоянного тока)	10–14 В
Потребляемый ток в рабочем режиме	180 мА
Температура эксплуатации	–40–+80 °
При влажности	0–100%
Режим работы	непрерывный

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

Формирование и распространение взрывного облака происходит под действием стратификации атмосферы. Данные баллонного зондирования, которое проводится два раза в сутки на метеорологической обсерватории “Ключи” Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу за окружающей средой, дают возможность определять направление и скорость распространения взрывных облаков от взрывных извержений вулканов Северной группы (<http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/intl2000.wmo>). Обсерватория “Ключи” находится в 48 км к юго-западу от вулкана Шивелуч (см. рис. 1).

Комплексный подход, основанный на геофизических и спутниковых методах, позволяет осуществлять селекцию сигналов в E_Z ЭПА, обусловленных прохождением газо-пепловых облаков от взрывных извержений вулкана Шивелуч.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ИЗУЧЕНИЯ ВАРИАЦИЙ E_Z АЭП, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОХОЖДЕНИЕМ ВЗРЫВНЫХ ОБЛАКОВ

Во время извержения вулкана Шивелуч 16 декабря 2016 г. в 22:31² по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) высота взрывного облака, оцененная по интенсивности сейсмического сигнала [Близнецов, Сеньюков, 2015], составила 5.6 км. Спустя ~2 часа в поселке Ключи был отмечен пеплопад интенсивностью 20 гр/м².

Рассмотрим картину распространения взрывного облака от этого извержения по данным ветровой стратификации (баллонное зондирование) и космическим снимкам в этот период времени. На космических снимках, полученных на приемной станции Унискан-36 с полуторачасовым интервалом (рис. 4а, 4б), взрывное облако движется под действием ветра с азимутом ~75° со скоростью ~17 м/с. Согласно стратификации атмосферы это соответствует азимуту и скорости ветра в интервале высот 6.5–8.0 км (см. рис. 4б).

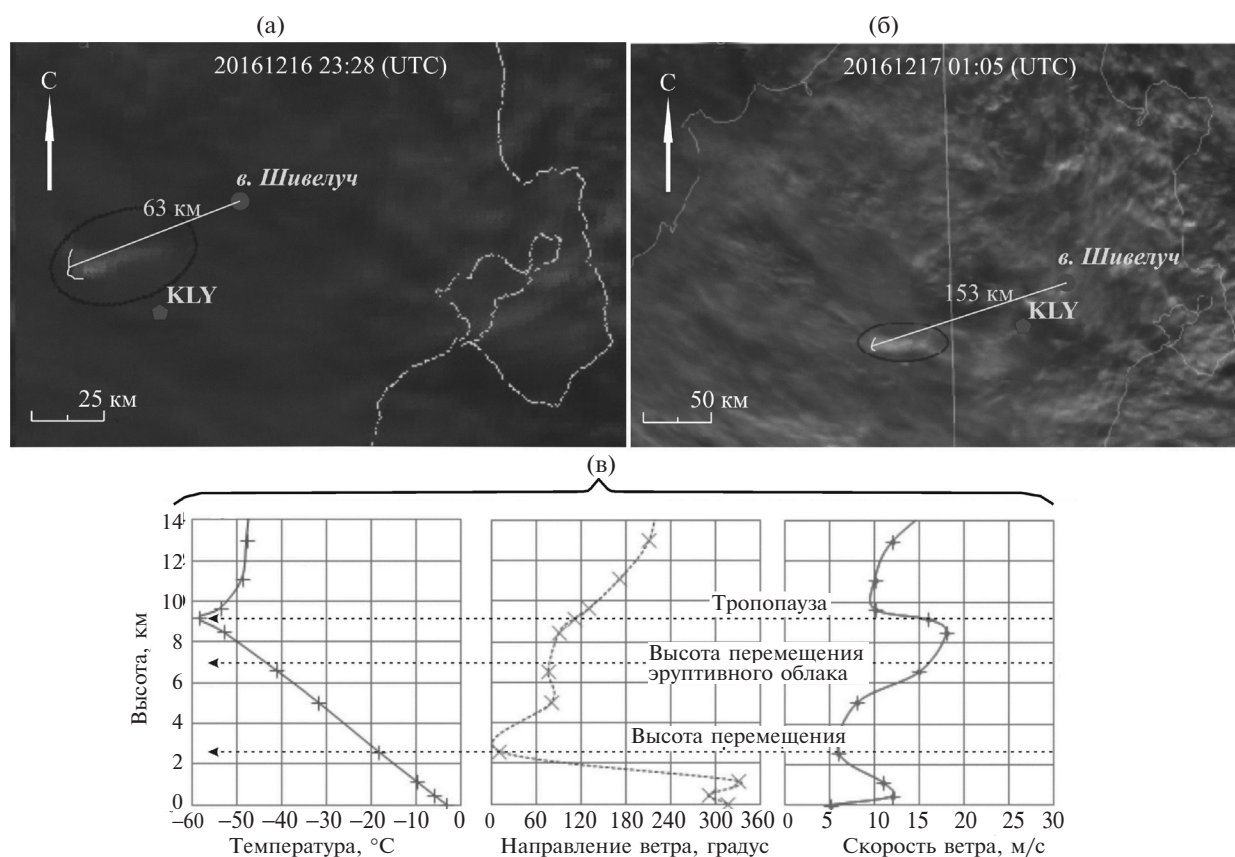


Рис. 4. Распространение взрывного облака от извержения вулкана Шивелуч 16.12.2016 в 22:31 и стратификация атмосферы по данным баллонного зондирования на метеостанции Ключи.

а, б — спутниковые снимки (Terra MODIS) взрывного облака, полученные в режиме реального времени на приемной станции Унискан-36 ИВиС ДВО, **в** — температурная и ветровая стратификация атмосферы 17.12.2016 в 00:00.

²Здесь и далее время UTC.

В этом случае пепел не должен был выпасть в поселке Ключи, однако спустя около двух часов начался пеплопад, интенсивность которого составило $\sim 20 \text{ г/м}^2$. Второе эруптивное облако, причастное к пеплопаду, должно было сноситься ветром с азимутом $\sim 45^\circ$ и скоростью $\sim 5 \text{ м/с}$, что соответствует стратификации атмосферы на высоте 2.5 км (см. рис. 4в). На спутниковых снимках такое эруптивное облако не просматривается.

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

Эксплозивное землетрясение (ЭЗ) на РТСС SMK длительностью ~ 15 минут, сопровождавшее эксплозию 16 декабря 2016 г., довольно слабое

($A_{\text{max}} = 4 \text{ мкм/с}$) и сильно зашумлено помехами (рис. 5а). После фильтрации фильтром высоких частот (ФВЧ) с граничной частотой $f_{\text{гр}} = 0.5 \text{ Гц}$ рассчитывалась спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала (см. рис. 5б). В интервале частот 1–10 Гц уровень СПМ относительно фона почти постоянен, также просматривается участок СПМ до 20 Гц, что не характерно для ЭЗ [Фирстов и др., 2012].

Акустический сигнал на записях микробагрографа ближайшего пункта KLYA обнаружен не был. В целом эту эксплозию можно охарактеризовать как “продувку”, то есть длительное истечение пепло-газовой смеси.

Пеплопад в поселке Ключи сопровождался отрицательной однополярной аномалией в ЭПА с минимальным значением -1.23 кВ/м и общей длительностью ~ 45 минут (15 минут – передний фронт и 30 – задний). По форме заднего фронта

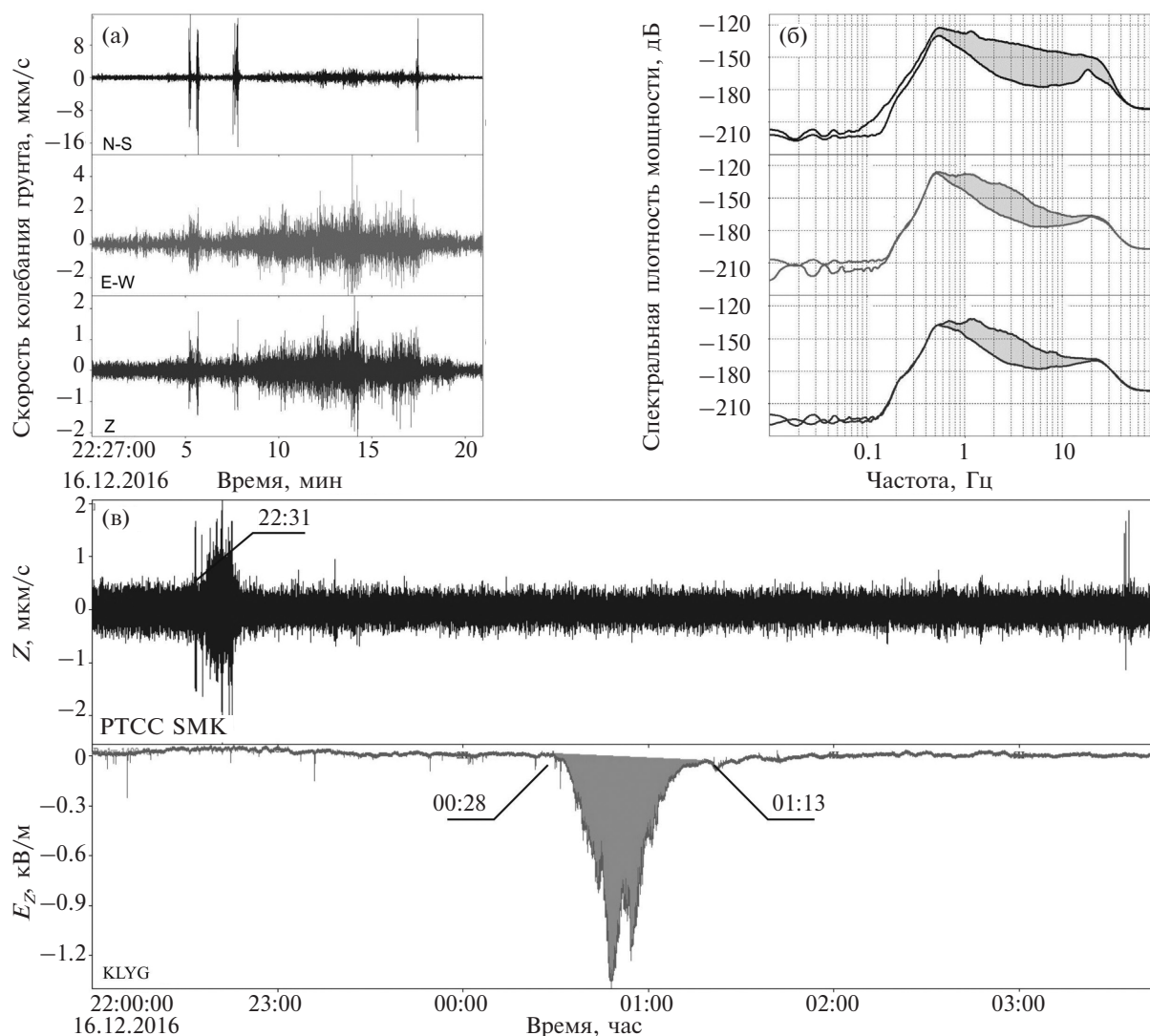


Рис. 5. Три компоненты скорости колебания грунта сейсмического сигнала на РТСС SMK, сопровождавшего эксплозивное извержение 16.12.2016 г. вулкана Шивелуч, после фильтрации ФВЧ с $f_{\text{гр}} = 0.5 \text{ Гц}$ (а), спектральная плотность мощности сейсмического сигнала (б), запись сейсмического сигнала и вариаций E_z ЭПА (в). Серым цветом показан отклик в E_z ЭПА на прохождение второго эруптивного облака.

аномалии в E_z ЭПА [Чернева и др., 2007] можно говорить, что эруптивное облако представляло собой тонкое аэроэлектрическое образование,двигающееся горизонтально на высоте 2.5 км. За счет эоловой дифференциации облако приобрело значительный горизонтальный размер ~9 км, который оценен по длительности заднего фронта аномалии E_z ЭПА и скорости ветра на высоте 2.5 км.

Во время извержения вулкана Шивелуч 14 июня 2017 г. в 16:26 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 ~12 км.

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 кру-

говое эруптивное облако диаметром ~70 км на высоте 9 км (рис. 6а). Далее, согласно ветровой стратификации, эруптивное облако стало двигаться к поселку Ключи со скоростью 12 м/с (см. рис. 6а, 6б, 6в). Формирование эруптивного облака в первые минуты после начала эксплозивного извержения зафиксировано на станции KLYG видеокамерой, которая осуществляет мониторинг активности вулкана Шивелуч (см. рис. 6г).

Почти через час эруптивное облако накрыло поселок Ключи, где выпало 100 г/м² пепла (см. рис. 6д). После чего эруптивное облако продолжило движение по направлению к Ключевскому вулкану (см. рис. 6е). В 21:33 эруптивное облако достигло поселка Козыревск, где наблюдалось слабое выпадение очень мелкодисперсного пепла.

На РТСС SMK эксплозивное землетрясение, сопровождавшее это извержение, имело длительность около десяти минут. Ограниченная

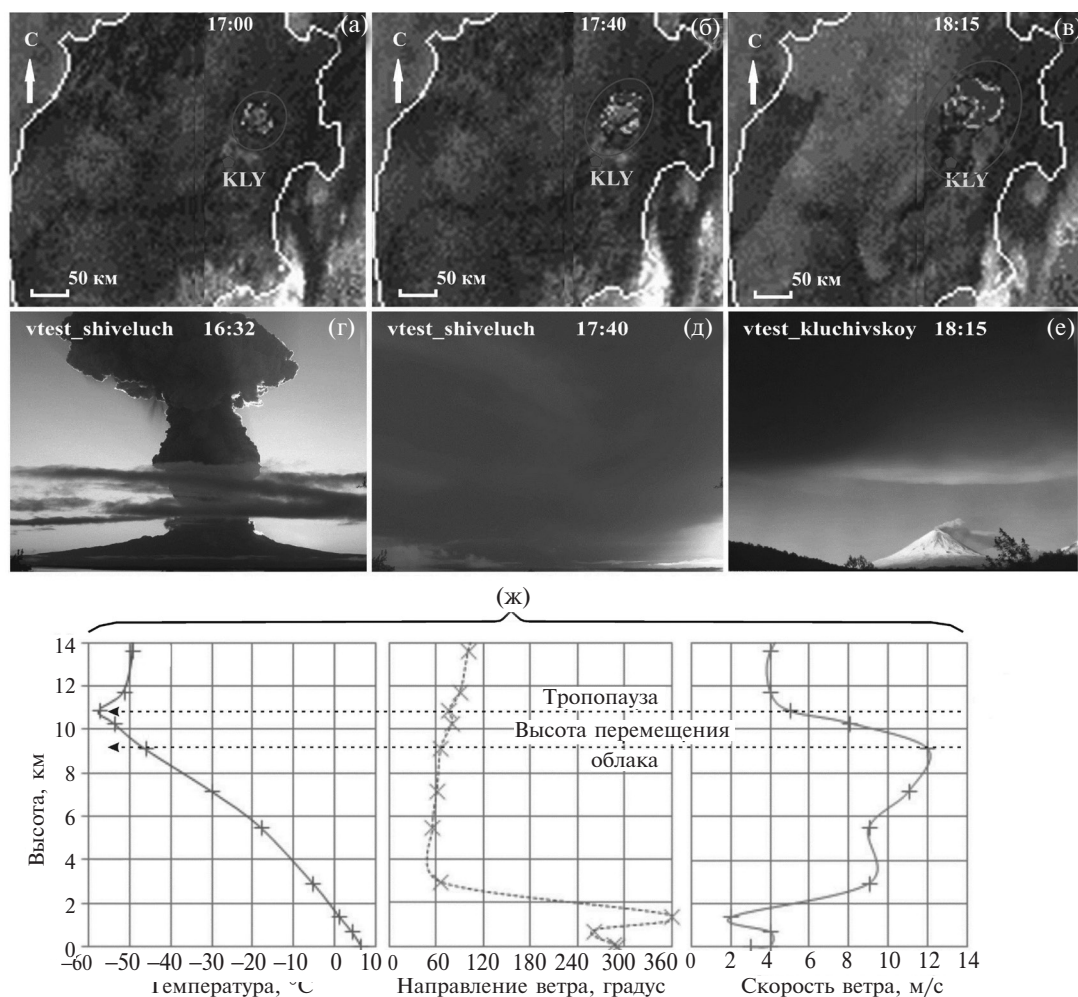


Рис. 6. Распространение эруптивного облака от извержения вулкана Шивелуч 14.06.2017 г. в 16:26 по данным спутниковых снимков HIMAWARI-8 (а, б, в) (<http://rammb.cira.colostate.edu/>), развитие эруптивного облака, зафиксированное видеокамерой (г, д, е), температурная и ветровая стратификации атмосферы по данным баллонного зондирования (ж).

динамическим диапазоном аппаратура не смогла зарегистрировать максимальную амплитуду скорости колебания грунта, но можно говорить, что ее амплитуда превысила $A_{\max} > 400$ мкм/с (рис. 7а). СПМ для трехминутной записи ЭЗ имеет максимум на частоте один герц и заключена в пределах 0.4–10 Гц, что характерно для ЭЗ [Фирстов и др., 2012].

Данное извержение сопровождалось воздушной ударной волной (ВУВ), которая с расстоянием эволюционировала в инфразвуковую и была зарегистрирована всеми микробарографическими каналами на полуострове Камчатка (рис. 8). Время задержки АС относительно сейсмического сигнала на РТСС SMK, который можно считать за начало извержения, для KLYA составило 2.19 мин, а для KZYA – 5.28 мин. На IS44 выделяются два прихода отдельных групп инфразвуковых волн, связанных с распространением звукового луча в стратосферном и тропосферном волноводах.

С целью оценки энергии взрывного процесса с использованием параметров ВУВ, в первом приближении, можно рассчитать тротильный эквивалент (Q) в кг, по методике, которая используется для оценки взрывов взрывчатых веществ. На основании закона подобия обычно рассматривают параметры ВУВ в зависимости от приведенного расстояния $\bar{r} = r/Q^{1/3}$.

Многочисленные работы по изучению распространения ВУВ от взрывов позволили по-

лучить ряд эмпирических формул, имеющих вид степенных многочленов. На основе эмпирической формулы $I_+ = 220 \cdot Q^{2/3} / r$ [Цейтлин, Смолий, 1981], по величине импульса длительностью τ , вычисленного по формуле

$$I_+ = \int_0^{\tau} \Delta P(t) dt,$$

Па·с, оценим величину $Q = 4 \cdot 10^3$ кг. Следует отметить, что примененная зависимость $I_+ = f(Q)$ работает в интервале $10 < \bar{r} < 100$, поэтому для нашего случая оценка Q является минимальной. Таким образом, эксплозия 14.06.2017 г. началась с сильного взрыва, после которого в течение 10 минут происходило постепенно затухающее истечение пепло-газовой смеси из кратера вулкана.

Удачное сочетание “условий хорошей погоды” и направления ветра при извержении 14 июня 2017 г. позволили зарегистрировать отклик E_Z ЭПА во время прохождения эруптивного облака над поселками Ключи и Козыревск. С момента начала выпадения пепла в Ключах в 17:40 на KLYG началось уменьшение E_Z ЭПА до -6 кВ/м, которое затем сменилось резким увеличением E_Z ЭПА до +5 кВ/м (рис. 9). Значительно большая амплитуда отрицательной фазы по сравнению с первым случаем согласуется со значительным количеством пепла ~100 г/м², выпавшем в поселке Ключи.

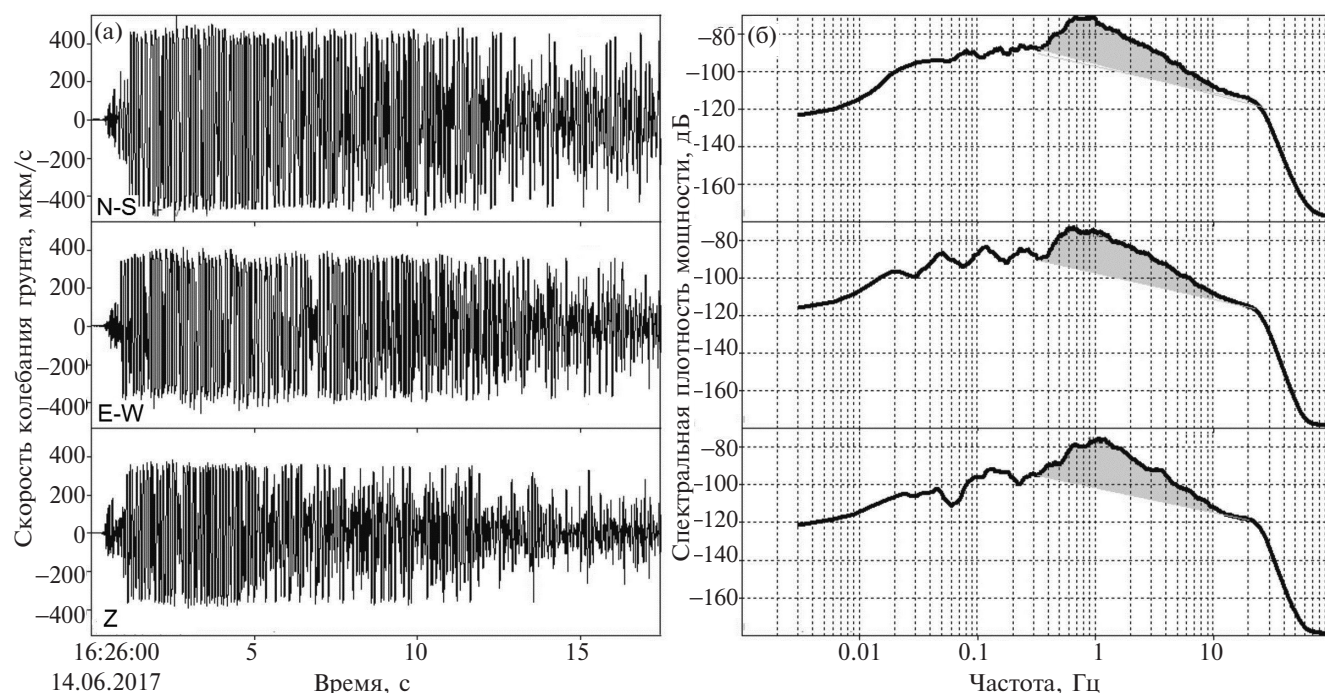


Рис. 7. Три компоненты скорости колебания грунта сейсмического сигнала на РТСС SMK, сопровождавшего эксплозивное извержение 14.06.2017 г. вулкана Шивелуч (а), спектральная плотность мощности участка сейсмического сигнала в 180 с (б).

В работе [Чернева и др., 2007] рассчитан отклик в E_Z ЭПА от объемных зарядов с простой конфигурацией, транспортируемых ветром и расположенных над проводящей поверхностью, и приведены модельные кривые в безразмерных величинах. Форма рассматриваемой аномалии напоминает изменение E_Z ЭПА горизонтального диполя, ось которого ориентирована вдоль движения и проходящего через пункт регистрации.

По-видимому, диполь сформировался за счет эоловой дифференциации, когда в передней части эруптивного облака крупные частицы пепла были заряжены отрицательно, а отстающая аэрозольная часть облака — положительно.

На основе стратификации атмосферы и кинематических параметров аномалии можно оценить параметры диполя: движение начинается за 40 км от KLYG; скорость движения диполя

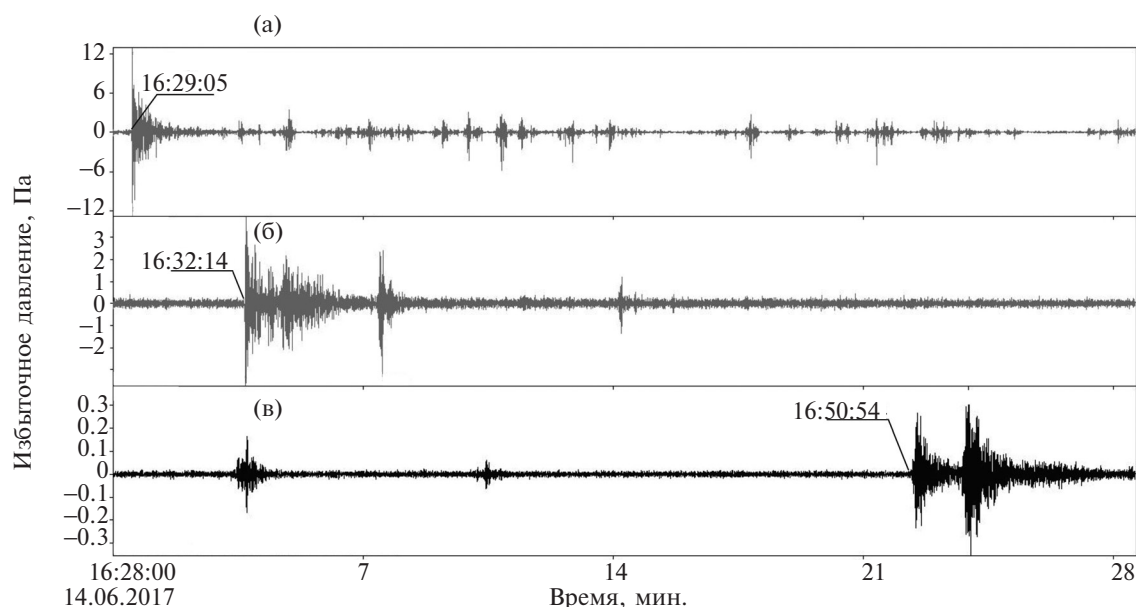


Рис. 8. Запись воздушной волны, сопровождавшей извержение 14.06.2017 г., на акустических станциях: KLYA (а), KZYA (б), IS44 (в).

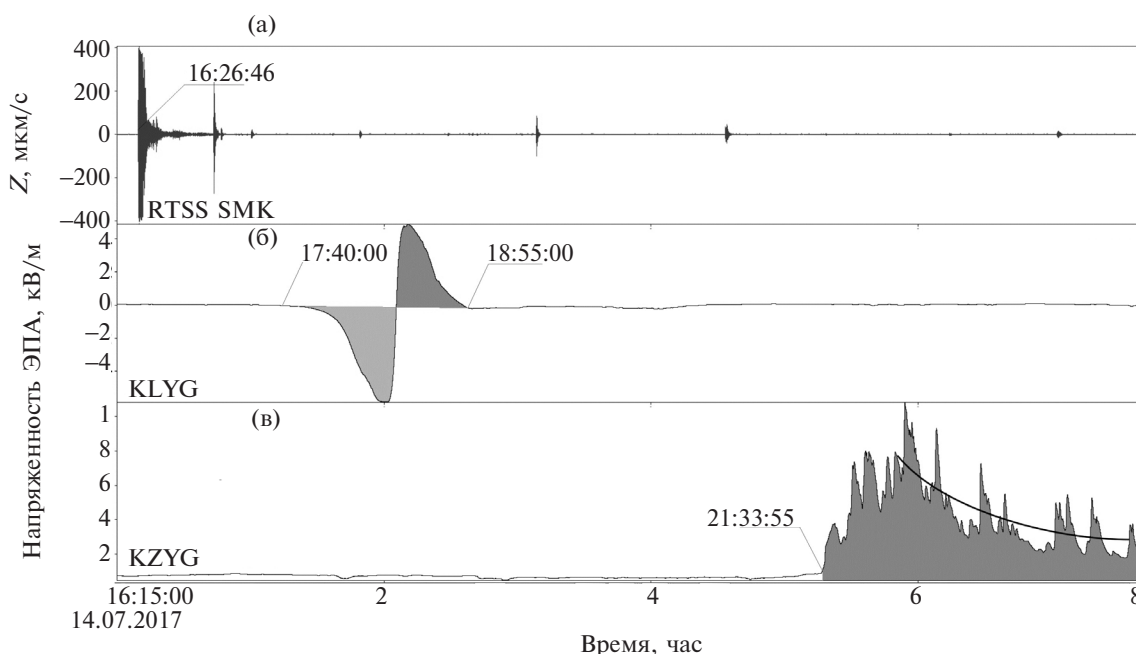


Рис. 9. Фрагменты записи: скорости смещения грунта вертикальной составляющей на RTSS SMK (а), напряженности ЭПА в KLYG (б) и KZYG (в).

36 км/час; высота над землей центра диполя $z = 9$ км; расстояние между зарядами 2.5 км. Исходя из этих параметров, рассчитаем в первом приближении заряд диполя q по формуле

$$E_Z = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 z^2}, q \approx 40 \text{ Кл},$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл/В·м, электрическая постоянная.

Почти через 5 часов эруптивное облако достигло п. Козыревск, где отмечалось выпадение незначительного количества мелкодисперсного пепла. Флюксометром KZYG была зарегистрирована аномалия по форме соответствующая заряженному облаку положительного заряда [Чернева и др., 2007], которая указывает, что в процессе эоловой дифференциации образовалось аэрозольное облако с незначительным количеством очень тонкого пепла.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высота экструзивного купола вулкана Шивелуч в последние годы стабилизировалась на высоте примерно 600 м. Стали наблюдаться раскаленные лавины, а отдельные эксплозии часто сопровождаться обвалами. По-видимому, экструзивный конус достиг предельной высоты, а указанные выше процессы компенсируют рост купола за счет выжимания экструзивного материала.

На основании комплексных данных, полученных дистанционными методами, рассмотрены особенности двух эксплозий вулкана Шивелуч. Определенную роль для понимания физики эксплозивных извержений является наблюдения за электризацией эруптивных облаков. Информативность этого метода определяется двумя факторами: “условиями хорошей погоды”, так как этот метод чувствителен к вариациям метеорологических величин; к расположению

флюксометров относительно источника, которые надо располагать, учитывая розу ветров в районе вулкана Шивелуч по многолетним наблюдениям. Исходя из этих ограничений, даже получение единичных наблюдений за откликом E_Z АЭП при прохождении эруптивных облаков представляет большой интерес.

Несмотря на значительное количество эксплозивных извержений за прошедшие годы (см. рис. 2) пеплопады во время извержений в пос. Ключи наблюдались редко. Из этого следует, что для уверенной регистрации вариаций E_Z АЭП пункты наблюдений должны быть размещены в направлениях основных осей пеплопадов, формируемых розой ветров.

Слабая эксплозия вулкана Шивелуч 16 декабря 2016 г. в 22:31, вероятно, сопровождавшаяся обвалом, представляла “продувку” в течение более 10 минут, в результате которой сформировавшееся эруптивное облако на высоте ~ 6 км, ушедшее на юго-запад минуя пункт KLYG. В то время как пепловое облако от обвала, сформировавшееся на высоте ~ 2.5 км, прошло над пос. Ключи и дало аномалию в E_Z АЭП, характерную для облачных структур.

Мощная эксплозия вулкана Шивелуч 14 июня 2017 г. в 16:26 представляла собой “взрыв” с последующей “продувкой”. Возникшее при этом эруптивное облако прошло над двумя пунктами (KLYG-48 км, KZYG-109 км). Если в ближайшем пункте эруптивное облако имело электрическую структуру в виде диполя, то в дальнем пункте электрическая структура эволюционировала за счет эоловой дифференциации в заряженное отрицательно облако.

Сравнение параметров эксплозий 2016 и 2017 гг., полученных дистанционными методами, дают некоторое представление о возможностях этих методов. В дополнение рассмотрим химический (табл. 2) и гранулометрический (рис. 10) составы пеплов, выпавших в поселке Ключи, от рассмотренных эксплозий.

Таблица 2. Химический состав пеплов извержений вулкана Шивелуч

Дата	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	nnn	Sun	Fe ₂ O ₃ / FeO
16.12.2016	65.80	0.44	15.40	1.24	2.38	0.08	5.14	2.60	4.87	1.43	0.14	0.29	99.82	0.52
14.06.2017	64.20	0.59	15.30	2.35	2.44	0.09	5.50	3.30	4.43	1.22	0.14	0.37	99.95	0.96

Примечание. Анализы выполнены в аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН. Аналитики А.А. Кузьмина, Н.Ю. Курносова, В.М. Рагулина.

Пепел 2016 г. имеет свежий, ювенильный облик, представлен преимущественно, светлыми прозрачными неокрашенными частицами плаггиоклаза с небольшой долей темноцветных минералов. В пеплах 2017 г., кроме того, присутствует заметное количество окисленных обломков тех

же минералов ржаво-бурого цвета, что указывает на присутствие некоторой доли резургентного материала. Это подтверждается и результатами химического анализа пеплов. По химическому составу пеплы практически идентичны и являются среднекалиевыми дацитами известко-

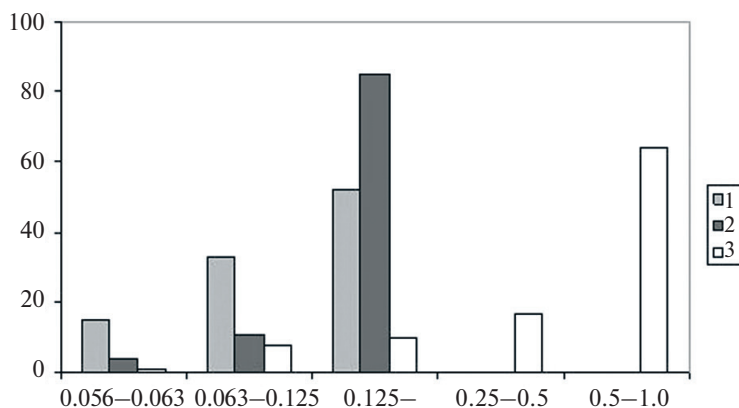


Рис. 10. Гранулометрический состав пеплов вулкана Шивелуч.

1, 2 — отборы в п. Ключи 16.12.2016 г. и 14.06.2017 г., соответственно, 3 — отборы в верховье р. Байдарной 14.06.2017 г. (отобран А.Б. Белоусовым).

во-щелочной серии. Однако, пепел 2017 г. по сравнению с пеплом 2016 г. имеет несколько менее кислый состав и заметно более высокую степень окисления, как следует из отношения в них $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$: 0.96 и 0.52, соответственно.

Гранулометрический состав пеплов представлен на рис. 10. Оба пепла (2016 и 2017 гг.), отобранные в поселке Ключи, имеют аналогичный характер распределения, но пепел 2017 г. несколько более крупнозернистый (см. рис. 10). Для сравнения приведен гранулометрический состав пепла 2017 г., отобранного в верховье р. Байдарной. Естественно, пепел, отобранный в 7 км от кратера, значительно крупнозернистее по сравнению с пеплами, транспортированными ветром на расстояние 48 км.

Из результатов гранулометрического и химического анализа пеплов следует, что пепел 2016 г. связан с более слабым эруптивным событием, последовавшим после схода обвала или раскаленных лавин. Пепел 2017 г. отражает результат более мощного, чем в 2016 г., взрывного события, захватившего заметную долю внешних, окисленных частей экструзии. При этом пепел, выпавший в п. Ключи, претерпел оловую дифференциацию относительно пепла, отобранного в ближней зоне вулкана (см. рис. 10).

Несмотря на незначительные различия гранулометрического и химического состава пеплов, эруптивные облака для рассмотренных случаев имели различные аэроэлектрические структуры. Это указывает на то, что физические процессы, связанные с образованием эруптивных облаков, определяют их электризацию. Если в первом случае пепло-воздушное облако было “сухое”, поэтому и сформировалась аэроэлектрическая структура “типа заряженное облако”. Во втором случае в результате сильной эксплозии в атмосферу было выброшено большое количество пеп-

ла и вулканических газов, в которых более 90% приходится на водяной пар [Меняйлов и др., 1991]. Поэтому в ближней зоне (KLYG, $R = 48$ км) в результате оловой дифференциации сформировалась дипольная аэроэлектрическая структура (см. рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирования нового экструзивного купола в кальдере вулкана Молодой Шивелуч наблюдается с 1980 г. Столь продолжительный цикл вулканической активности дает возможность планомерно изучать динамику извержения. Наряду с прямыми методами изучения изменений морфологии купола, определения его роста и изменений объема, важны другие методы. Одним из таких методов может быть исследование электризации эруптивных облаков во время взрывных этапов извержений. В представленной работе показано, что напряженность электрического поля атмосферы при прохождении эруптивных облаков над пунктом KLYG, возникших во время взрывных извержений 16.12.2016 г. и 14.12.2017 г., составляет -1.2 и -6.0 кВ/м, соответственно. Такие значения E_z АЭП достаточно уверенно выделяются на фоне помех, связанных с вариациями метеорологических величин.

Создание сети пунктов для регистрации E_z ЭПА в районе действующих вулканов даст возможность получать некоторые оценки размеров вулканического аэрозоля и его динамики в процессе эволюции и переноса эруптивных облаков. Кроме того, существенно дополнит картину переноса эруптивных облаков с малой концентрации аэрозоля недоступных наблюдению со спутников.

Следует особо отметить, регистрация напряженности электрического поля выполняет-

ся дистанционно, что является положительным фактором при изучении таких вулканов как Шивелуч, на которых возможны мощные катастрофические извержения типа “направленный взрыв”.

Авторы выражают благодарность В.С. Ефимову за большую помощь в организации аппаратной базы, Ю.А. Владимирову и Р.А. Коневу за помощь в эксплуатации флюксометров, а также А.А. Коневу за помощь в оформлении рисунков. Авторы очень признательны за советы и конструктивную критику П.М. Нагорскому, способствующему улучшению работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–35–00175/18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамчук Ю.В., Титов В.В. Электрические процессы и образование молний в вулканическом аэрозоле // Препринт ИАЭ-4016/1. 1984. 117 с.
- Акбашев Р.Р., Фирстов П.П. Изменение градиента потенциала электрического поля атмосферы Земли при прохождении шлейфов вулканических извержений // Материалы XII Международной сейсмологической школы “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”, 11–15 сентября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 18–19.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предвалявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 116–127.
- Близнецов В.Е., Сениуков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 46–59.
- Гордеев Е.И., Гирина О.А. Вулканы и их опасность для авиации // Вестник РАН. 2014. Т. 84. № 2. С. 134–142. DOI: 10.7868/S0869587314020121
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
- Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. 302 с.
- Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Ефимов В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П., Акбашев Р.Р. Применение электростатического флюксометра “ЭФ-4” для исследований геодинимических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 4. С. 14–24.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 3–13.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 1–15.
- Жаринов Н.А., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В. Новый эруптивный цикл вулкана Шивелуч 1980–1993 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 20–28.
- Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–533.
- Махмудов Е.Р., Фирстов П.П., Будилов Д.И. Информационная система для мониторинга волновых возмущений в атмосфере на полуострове Камчатка “KamIn” // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 5–16.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности фумарольных газов на различных стадиях активности вулканов Тихоокеанского вулканического пояса // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 79–82.
- Пономарев Е.А., Чернева Н.В., Фирстов П.П. Формирование локального электрического поля атмосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 3. С. 405–411.
- Руленко О.П. Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков / Автореф. дисс. ... кандидата физ.-мат. наук. СПб., 1994. 16 с.
- Руленко О.П., Токарев П.И. Атмосферно-электрические эффекты Большого трещинного Толбачинского извержения в июле–октябре 1975 г. // Бюлл. вулканостанции. 1979. № 56. С. 96–102.
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт Р. и др. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // Известия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 1. С. 29–37.
- Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Жданова Е.Д., Кирьянов В.Ю. Начало нового эструзивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4/5. С. 33–46.
- Фирстов П.П., Махмудов Е.Р., Макаров Е.О., Фи Д. Комплексные геофизические наблюдения на вулкане Карымский (Камчатка) в августе 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 110–120.
- Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–16.
- Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. 136 с.
- Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
- Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Фирстов П.П., Бузевич А.В. Базовые модели источников вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 60–64.

Firstov P., Cherneva N., Akbashev R. Natural factor impact on atmospheric electric field variations in Kamchatka // *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. E3S Web of Conferences* 20. 01003. 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20172001003

James M.R., Lane S.J., Gilbert J.S. Volcanic plume monitoring using atmospheric electrical potential gradients // *J. Geol. Soc. London*. 1998. № 155. P. 587–590.

Hatakeyama H. On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the smoke-cloud of the volcano Yakeyama // *J. Met. Soc. Japan*. 1949. № 27. P. 372–376.

Hatakeyama H., Uchikawa K. On the Disturbance of the Atmospheric Potential Gradient caused by the Eruption-

smoke of the Volcano Aso // *J. Met. Soc. Japan*. 1951. V. 21. P. 84–89.

Mather T.A., Harrison R.G. Electrification of volcanic plumes // *Serv. Geophys.* 2006. V. 37. P. 387–432. DOI: 10/1007/s10712-006-9007-2

Miura T., Koyaguchi T., Tanaka Y. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima volcano Japan // *Bull. Volcanol.* 2002. V. 64. P. 75–93.

Shevtsov B.M., Firstov P.P., Cherneva N.V. et al. Lightning and electrical activity during the Shiveluch volcano eruption on 16 November 2014 // *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.* 2016. V. 16. P. 871–874. DOI: 10.5194/nhessd-16-871-2016

ELECTRIC CHARGING OF ERUPTIVE CLOUDS FROM SHIVELUCH VOLCANO CAUSED BY DIFFERENT TYPES OF EXPLOSIONS

**P. P. Firstov^{1, *}, R. R. Akbashev¹, N. A. Zharinov², A. P. Maximov²,
T. M. Manevich², D. V. Melnikov²**

¹*Kamchatka Branch, National Seismological Center, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*Institute of Volcanology and Seismology Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*e-mail: firstov@emsd.ru

Received July 05, 2018

The number of explosive eruptions at Shiveluch Volcano has significantly increased over the past years, which requires close volcanic monitoring using all available techniques. In order to implement a new monitoring technique into integrated methods of volcano monitoring, the authors analyze response to the intensity of the vertical component in the atmospheric electrical field (E_z AEF) during the movement of ash clouds. Two eruptions of different intensity that occurred December 16, 2016 and June 14, 2017 at Shiveluch were selected for study. We used a combination of satellite, seismic, and infrasound data to select signals in the E_z AEF field. Signals with negative polarity that accompanied ashfalls in the E_z AEF dynamics were registered for both eruptions within the closest area (< 50 km). In the former case, the ash cloud was “dry” and thus it caused aerial-electrical structure of the negatively charged cloud. In the latter case, a strong explosion sent into the atmosphere the large volume of ash and volcanic gases (98% in form of vapour) that resulted in the formation of a dipolar aerial-electrical structure caused by eolian differentiation within the closest area. At the distance of more than 100 km we registered a positive-going signal that is attributive to the aerial-electrical structure of the positively charged type of the cloud.

Keywords: volcano eruptions, ash clouds, atmospheric electrical field.