

УДК 551.594

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЭКСПЛОЗИЙ ВУЛКАНА ЭБЕКО И ИХ ОСОБЕННОСТЬ

Акбашев Р.Р.¹, Фирстов П.П.¹, Уваров В.Н.²,

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, arr@emsd.ru

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Камчатский край, с. Паратунка, uvarovvnng@yandex.ru

Введение

Постоянное электрическое поле атмосферы является высокочувствительным индикатором множества глобальных и локальных процессов. Прежде всего, это глобальная грозовая активность, которая в основном формирует глобальную электрическую цепь [7]. В качестве локального масштаба, влияющего на динамику ЭПА полуострова Камчатка, следует рассматривать эпизодическое воздействие высокоэнергетических геодинамических процессов (землетрясения и извержения вулканов) [5,6,8,9,10,12]. Для изучения таких процессов на п-ове Камчатка создана сеть пунктов наблюдения (ПН) вертикальной составляющей электрического поля атмосферы (E_z ЭПА). Сеть ПН E_z ЭПА действует с 2013 г. ПН организованы на базе сейсмологических станциях КФ ФИЦ ЕГС РАН в п. Козыревск (KZVG) с 2013 г., в п. Ключи (KLYG) с 2016 г., в п. Крутоберегово (KBGG). Последний ПН E_z ЭПА введен в работу в октябре 2018 г. вблизи действующего вулкана Эбеко. Данный ПН создан на базе сейсмостанции СФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Северо – Курильск (SKRG). На рис. 1 а показана схема сети ПН E_z ЭПА.

Действующий стратовулкан Эбеко (50°41'20" с. ш., 156°00'54" в. д) высотой 1156 м н.у.м., по частоте извержений является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги, состоит из нескольких четвертичных вулканических конусов. Он располагается в северной части хребта Вернадского на острове Парамушир в 7 км к западу от г. Северо-Курильска (рис. 1а). В последние столетия извержения вулкана Эбеко можно отнести только к эксплозивным фреатическим или фреатомагматическим, длительность которых, как правило, составляла 2-4 года, а периоды межэруптивной деятельности 20-30 лет [4]. Данный вулкан рассматривается авторами как природная лаборатория для натурных исследований атмосферно-электрических эффектов, возникающих от слабых эксплозивных извержений.

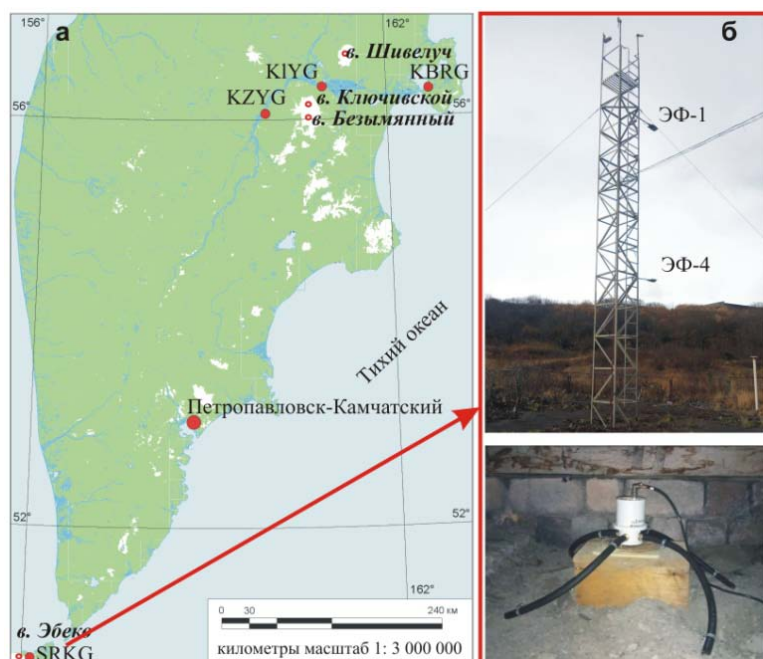


Рис. 1. Пункты наблюдения E_z ЭПА (а); вышка, на которой установлены флюксометры в ПН SKRG (б); размещение микробарографа ISGM-03М (в).

Аппаратура и методика наблюдений (ПН SKRG)

В настоящее время дистанционный мониторинг активности вулкана Эбеко контролируется с помощью сейсмической станции Северо-Курильск (SKR), которая расположена в 7 км от кратера вулкана, а также по данным видео/визуальных наблюдений и спутниковых снимков. В октябре 2018 г. на SKR силами КФ ФИЦ ЕГС РАН был установлен комплект аппаратуры с целью изучения атмосферно-электрических

эффектов, возникающих в эруптивных облаках.

Установлены два электростатических флюксометра типа ЭФ-4 [3] для регистрации E_z ЭПА на разной высоте мачты (рис. 1б).

С целью регистрации волновых возмущений в атмосфере, возникающих во время эксплозий вулкана Эбеко, на SKR был установлен микробарометра ISGM-03M с полосой регистрации 0.02 - 10 Гц в диапазоне амплитуд 0.001-100 Па. Общий вид микробарометра ISGM-03M показан на рис. 2б.

Для автоматизации процесса сбора и первичной обработки данных разработан программно-аппаратный комплекс регистрации E_z ЭПА на основе электростатического датчика ЭФ-4 [1], АЦП E-24, фирмы L-Card и микрокомпьютера серии Thiner Board фирмы Asus [2].

Комплексный анализ геофизических наблюдений (сейсмические наблюдения, инфразвуковые наблюдения, метеорологические данные, видеонаблюдения) обеспечивает точное выделение сигналов E_z ЭПА, характеризующие возмущения ЭПА от прохождения эруптивных облаков (ЭО) эксплозивных извержений. В результате анализа формируется каталог событий.

Вариации E_z ЭПА, обусловленные прохождением эруптивных облаков от эксплозии вулкана Эбеко

За период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2019 г. в SKR отмечено 47 случаев (таблица 2), когда был зарегистрирован отклик в E_z ЭПА при прохождении ЭО от вулкана Эбеко над пунктом наблюдения SKRG. Селекция полезных сигналов осуществлялась на основании непрерывной съемки вулкана видеокамерой, установленной на сейсмической станции. Естественно, эксплозии происходили при различных метеорологических условиях, как в условиях хорошей погоды (УХП), так и в сложных метеорологических условиях. Наблюдались так же случаи, когда при прохождении пеплового облака в непосредственной близости от пункта наблюдения отклик в E_z ЭПА не регистрировался.

Аномалии имели бухтообразную форму обеих полярностей и сравнительно редко в виде биполярного сигнала. Длительность аномалий составляла от 10 до 30 мин с средним значением амплитуды ~ 1.0 кВ/м, а максимальным $E_z = 3.0$ кВ/м.

Таблица 2. Параметры отклика в E_z ЭПА, зарегистрированного в SKRG, при прохождении эруптивных облаков от извержений вулкана Эбеко за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2019 г.

Пункт наблюдения SKRG			
Полярность сигнала	"+"	"-"	"±"
Количество случаев	23	18	6
Средняя амплитуда, кВ/м	0.73 ± 0.46	-0.89 ± 0.44	$1.42 \pm 0.75 / -0.78 \pm 0.36$

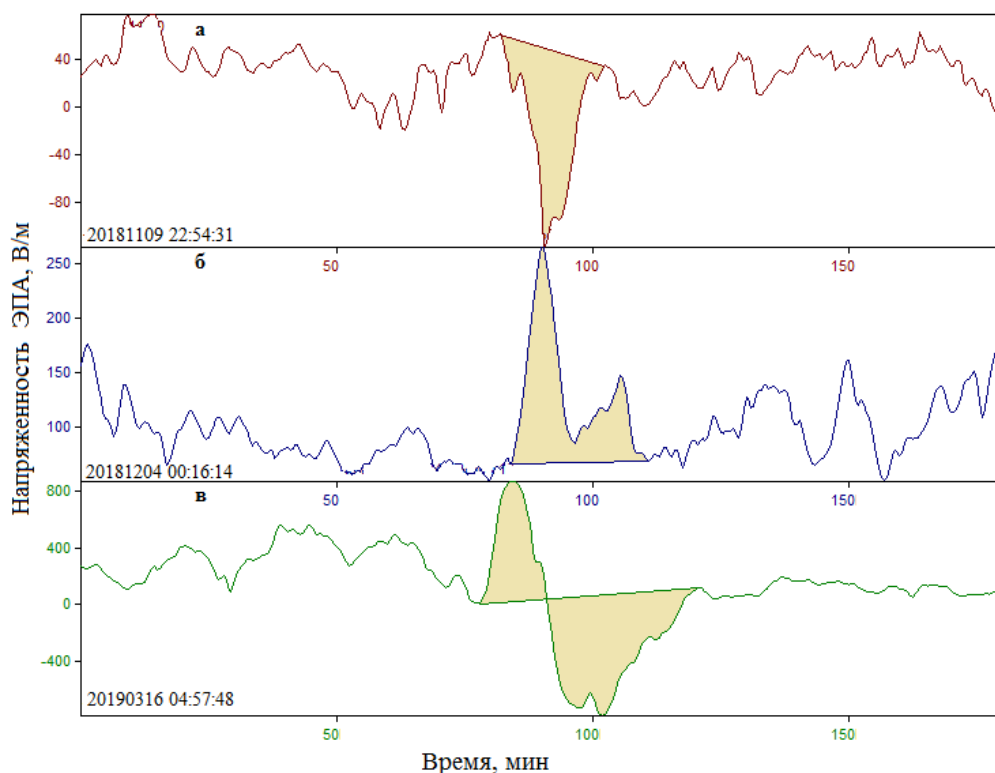


Рис. 2. Примеры откликов E_z ЭПА с отрицательной (а), положительной (б) и дипольной полярностью сигнала (в), возникающих при прохождении газо – пеплового облака от эксплозий вулкана Эбеко над SKRG.

На рис. 2 приведены примеры различных виды откликов E_z ЭПА на прохождение ЭО над пунктом наблюдения SKRG. Наблюдение трех видов аномалий свидетельствует о том, что при извержениях вулкана Эбеко происходили как эксплозии с фрагментацией материала, так и эксплозии с истечением преимущественно газовой фазы. Зарегистрированные возмущения ЭПА характеризуются и различной амплитудой сигнала. Высота и продолжительность формирования ЭО определялись по снимкам видеокамеры установленной на SKR (рис. 3).

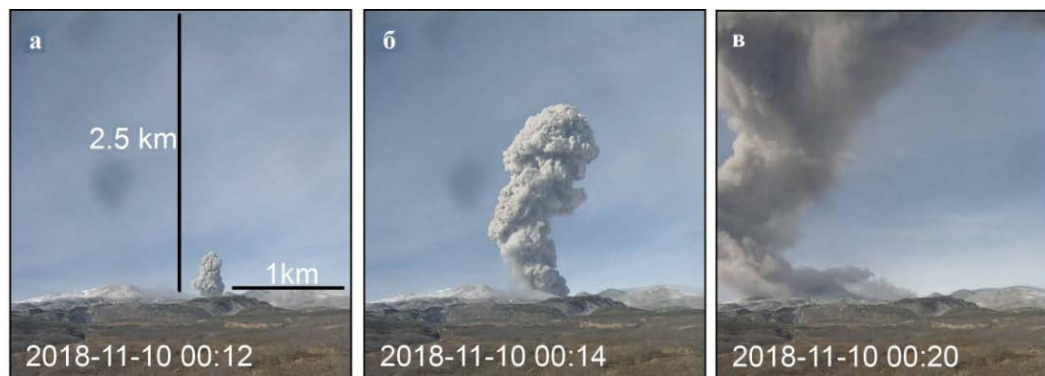


Рис. 3. Пример базового анализа распространения ЭО по данным видеонаблюдения за в. Эбеко 10.11.2018 г.

Рассмотрим в качестве примера эксплозию взрывного типа, произошедшую 10 ноября 2018 г. в 00:12. Развитие ЭО этой эксплозии приведено на трех снимках рис. 3, а отклик в E_z ЭПА на рис. 4. В этом случае пепло-газовое облако формировалось в течение ~ 12 мин. На снимках ЭО хорошо выделяется участок газового напора с последующей инжекцией пепло-газовой струи с квазистационарным режимом течения (рис. 3а,б). При этом происходит фрагментация лавы и первоначальное гравитационное разделение тефры. На данной стадии происходит электризация ЭО за счет ряда физических процессов. В дальнейшем на участке плавучести ЭО достигает точки равновесия и сносится ветром. За счет эоловой дифференциации происходит разделение заряженных частиц пепла и формируется аэрозольная часть облака, представленная мелкодисперсным пеплом и газовой составляющей (рис. 3в). Максимальная высота подъема ЭО составила ~ 3 км н.у.м. На основании видеонаблюдений следует, что на высоте 2 км ЭО распространялось не более 16 мин. Длительность аномалия в E_z ЭПА составляет ~ 15 минут (рис. 4). Это подтверждает, что аномалия E_z ЭПА определяется распространением шлейфа на высоте ~ 2 км, со скоростью 7.5 м/с.

Точные параметры распространения ЭО на стадии плавучести совместно с натурными данными откликов E_z ЭПА при его распространении, являются основой для изучения тонкой аэроэлектрической структуры ЭО и построения их математических моделей.

Электростатическая структура эруптивного облака

Электрическое поле вулканических облаков формируется в результате перемещения частиц аэрозоля относительно газовой среды под влиянием силы тяжести. Это явление связано с частичным увлечением двойного электрического слоя, возникающего на поверхности частиц, при движении сквозь среду. Возникающая при этом напряженность поля вызывает в среде релаксационные токи проводимости. Возникающее при этом электрическое поле (эффект Дорна) описывается выражением

$$E = \frac{4\epsilon\epsilon_0\zeta\Delta\rho r^3c}{3\eta\sigma} = \left(\frac{4\epsilon\epsilon_0\zeta}{3\eta}\right) \left[\frac{\Delta\rho r^3c}{\sigma}\right] \quad (1)$$

Здесь r – радиус частиц, c – их концентрация, $\Delta\rho$ – разность плотностей среды и частиц, η – вязкость среды, σ – ее электропроводность, ϵ, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость среды и диэлектрическая постоянная, ζ – дзета-потенциал.

В правой части этого выражения круглыми скобками выделен слабо меняющийся параметр среды, квадратными – сильно меняющийся в процессе извержения параметр, который может при определенных допущениях быть количественной характеристикой как извержения в целом, так и отдельных частей формирующегося вулканического шлейфа.

ЭО характеризуются значительной протяженностью (до нескольких сотен километров) при сравнительно небольшой толщине (от сотен метров до нескольких километров) [13,11] и пространственной неоднородностью электростатической структуры. Она возникает в процессе формирования и движения эруптивного облака под действием ряда физических процессов.

Для построения обозримой и удобной модели заряженного ЭО целесообразно обратиться к известным в электростатике представлениям, в основе которых лежит аппроксимация ограниченной однородной области точечным зарядом. Объединение таких областей в более сложные конфигурации (диполи, квадруполь и т.д.) позволяет с необходимой точностью аппроксимировать поле произвольной конфигурации.

Будем рассматривать небольшой пространственно однородный выпуклый объем ЭО в качестве простейшего элемента электростатической структуры - электростатического атома ЭО или «вулканической глобулы» (ВГ). Введение такого атома позволяет осуществить декомпозицию наблюдаемых ЭО по ВГ, выявив его глобулярную электрическую структуру, которую далее можно использовать для последующей оценки параметров извержения. Переход к глобулярной структуре ЭО в какой-то мере, подобен спектральному анализу. Поле, создаваемое однородно заряженным объемом, с достаточной точностью можно аппроксимировать полем точечного заряда. Параметрами, характеризующими ВГ, могут быть: диаметр (D_g) и заряд (Q_g) или эквивалентная ей пара D_g и плотность заряда $\rho_g = Q_g/D_g^3$.

Поле, создаваемое уединенным точечным зарядом Q_g описывается выражением:

$$E_z = \frac{Q_g}{4\pi\epsilon_0 R^3}, \quad (2)$$

где $R=(x^2+y^2+z^2)^{0.5}$, x, y, z – координаты ВГ.

Координаты выбираем так, чтобы движение ВГ было направлено вдоль оси x , тогда координату x можно определить через скорость ветра ($v=7.5$ м/с) и время $x = v \cdot (t - t_{extr})$, где t_{extr} – момент времени минимального удаления ВГ от пункта наблюдения, а y – минимальное расстояние от точки наблюдения до траектории при $x = 0$. Поле ВГ над проводящей поверхностью Земли является суперпозицией полей двух зарядов: непосредственно от нее и от индуцированного ей виртуального заряда противоположного знака. Проводимость атмосферного воздуха на много порядков ниже проводимости грунта. Поэтому для простоты можно считать проводимость грунта бесконечной. При таком предположении положение виртуального заряда оказывается ниже поверхности грунта на высоту ВГ. Наземные измерения поля обычно проводятся на уровне грунта. При этом горизонтальная компонента поля равна нулю и электрическое поле представлено только вертикальной компонентой. Измеряемое поле ВГ в этом случае аппроксимируется полем симметричного диполя с тем же зарядом, но базой равной удвоенной высоте глобулы:

$$E_z = \frac{Q_g \cdot z}{2\pi\epsilon_0 |R^3|} \quad (3)$$

Введем переменные $R_{min}=(z^2+y^2)^{0.5}$, $\gamma = v/R_{min}$ и перепишем уравнение (3).

$$E_z = \frac{\frac{Q_g}{2\pi\epsilon_0 R^3} \cdot z}{(1+(\gamma(t-t_{extr})))^{3/2}} \quad (4)$$

Это выражение позволяет определять величину уединенного точечного заряда по значениям экстремума электрического поля E_z , известному положению заряда относительно пункта регистрации и скорости ветра:

$$Q = \frac{E_z 2\pi\epsilon_0 R^3 (1+(\gamma(t-t_{extr})))^{3/2}}{z} \quad (5)$$

С использованием такого подхода результаты моделирования дают приемлемый результат (рис. 4). В дальнейшем планируется развивать методы математического моделирования к электростатическим неоднородностям ЭО. Рассчитанные величины зарядов (кулон) по значениям тах экстремумов получились +0.0305 Кл и -0.0276 Кл. Следует отметить наличие корреляции E_z . ЭПА с эволюцией шлейфа (рис. 3в, рис. 4)

Заключение

Регистрация вертикальной составляющей электрического поля атмосферы в приземном слое атмосферы вблизи действующих вулканов позволяет обнаружить присутствие даже слабонасыщенных пеплом эруптивных облаков. Сеть пунктов регистрации E_z . ЭПА вблизи извергающихся вулканов дает возможность обнаружения и оценки траектории движения эруптивного облака и степени насыщенности его мелкодисперсной фракцией пепла. Регистрация электрических процессов в эруптивных облаках может быть одной из составляющих комплексных наблюдений за вулканическими извержениями. В дальнейшем планируется развивать сеть пунктов мониторинга за E_z . ЭПА вблизи активных вулканов Камчатки.

Использование данных, получаемых системой мониторинга и развитых выше модельных представлений, позволяет оценивать параметры как извержения в целом, так и отдельных фрагментов

вулканического шлейфа, которые необходимы для оценки и прогнозирования опасности ЭО для различных сфер человеческой деятельности.

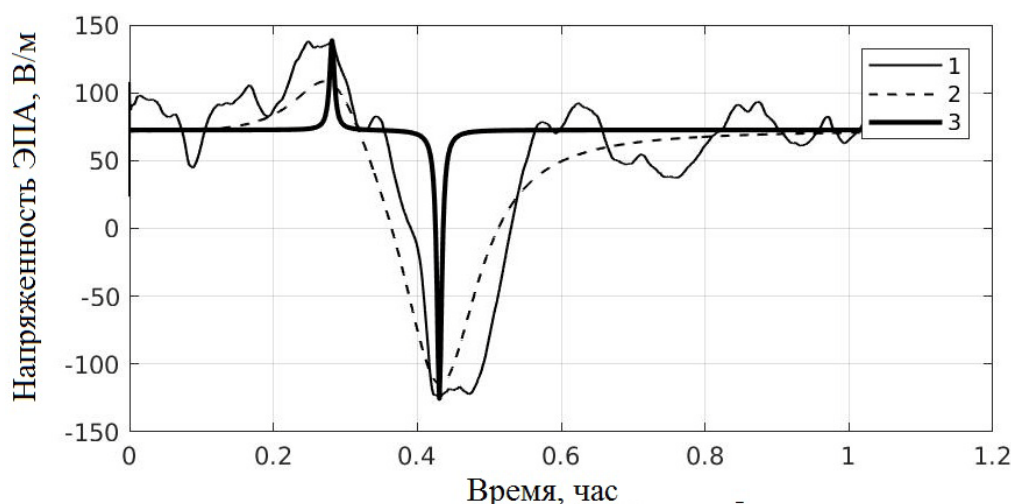


Рис. 4. Численное моделирование отклика E_z ЭПА в пункте SKRG на прохождении ЭО от извержения вулкана Эбеко 10.11.2018 г. 1- данные регистрации; 2 - оптимизированная аппроксимация; 3 – кулоновская аппроксимация.

Работа выполняется в рамках государственного задания по проекту АААА-А19-119031590060-3 и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 18-35-00175.

Список литературы

1. Адамчук Ю.В., Титов В.В. Электрические процессы и образование молний в вулканическом аэрозоле //Препринт ИАЭ-4016/1. 1984. С.117 с.
2. Будилов Д.И., Лобачева М.А., Фирстов П.П. Активность вулкана Алаид в 2015-2016 гг. по акустическим данным // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: VI Сахалин. молодеж. науч. школа, Южно-Сахалинск, 3–8 октября 2016 г.: сб. мат. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 220–224.
3. Ефимов В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П., Акбашев Р.Р. Применение электростатического флюксметра “ЭФ-4” для исследований геодинамических процессов //Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 4. С. 14–24.
4. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 2 // Вулканология и сейсмология. 1993. №4. С. 24–42.
5. Руленко О.П. Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков. Автореферат на соис. уч. ст. к.ф.-м.н. Санкт-Петербург, 1994. 16 с.
6. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт Р., Чернева Н.В., Шевцов Б.М. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // Известия РАН ФАО. 2017. Т.53. № 1. С. 29–37.
7. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
8. 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.
9. 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.
10. Miura T, Koyaguchi T, Tanaka Y Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima volcano Japan // Bull Volcanol. 2002. 64:75–93.
11. Rossi E., Bonadonna C., Degruyter W. A new strategy for the estimation of plume height from clast dispersal in various atmospheric and eruptive conditions // Earth and Planetary Science Letters. 2019. V. 505. P. 1–12.
12. Shevtsov B.M., Firstov P.P., Cherneva N.V., Holzworth R. H., Akbashev R. R. 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.
13. Woods A.W. The fluid-dynamics and thermodynamics of eruption columns // Bull. Volcanol. 1988. V.50. No. 3. P. 169–193.