

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ЭБЕКО (о. ПАРАМУШИР, РОССИЯ) В КОНЦЕ 2018 г. – НАЧАЛЕ 2019 г.

© 2020 П.П. Фирстов^{1,2}, Р.Р. Акбашев^{1,3}, Е.О. Макаров^{1,3}, Т.А. Котенко²,
Д.И. Будилов¹, М.А. Лобачева¹

¹Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: firstov@emsd.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006,

³Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683032

Представлены результаты комплексных геофизических наблюдений за активностью вулкана Эбеко в конце 2018 г. и начале 2019 г. Пункт наблюдений располагался на сейсмической станции «Северо-Курильск» на удалении 7.2 км от кратера вулкана. Выделены три типа отклика в вертикальной составляющей электрического поля атмосферы во время прохождения эруптивных облаков от эксплозий вулкана Эбеко, что свидетельствует о различном механизме их возникновения. Регистрация инфразвуковых акустических сигналов в ближней зоне позволила сделать оценку тротилового эквивалента для наиболее сильных эксплозий, которая составила не более 100 кг тринитротолуола. Обнаружены определенные закономерности в динамике объемной активности радона, связанные с вариациями метеорологических величин и гидрологическими особенностями пункта регистрации. Длительный период активности, близость пункта наблюдений к кратеру дают основание говорить, что вулкан Эбеко представляет собой природную лабораторию для изучения механизма извержений.

Ключевые слова: гидротермальное извержение, аэроэлектрические структуры, акустическое и сейсмическое излучения.

ВВЕДЕНИЕ

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 и состоит из нескольких четвертичных вулканических конусов. Он располагается в северной части хребта Вернадского (Рычагов и др., 2002) на о. Парамушир в 7 км к западу от г. Северо-Курильска (рис. 1). Вулкан сложен андезитами и базальтами с неогеновым вулканокластическим фундаментом на глубине ~200 м н.у.м. (Гидротермы ..., 2013; Горшков, 1970; Мелекесцев и др., 1993; Федорченко и др., 1989). Послеледниковый конус Эбеко состоит из лавовых потоков и пирокластов андезитового состава.

Конус вулкана сложен, в основном, пирокластикой. Его вершина, на которой расположены три соприкасающихся кратера, диаметры которых варьируются от 250 до 320, а глубины — от 70 до

100 м, вытянута в меридиональном направлении. На дне и склонах северного и южного кратеров, а также на внешних склонах центрального конуса наблюдается активная фумарольная и гидротермальная деятельность (Рычагов и др., 2002).

Особенностью вулканического хребта Вернадского является наличие в его недрах длительно живущей гидротермально-магматической системы, с которой связана вулканическая активность в виде периодически повторяющихся фреатических извержений. Фреатические и фреатоматматические извержения могут происходить в пределах глубокой (несколько километров) гидротермальной зоны, связанной с плутоническими телами (Рычагов и др., 2002). Оценки выноса на дневную поверхность хлора и серы фумарольными площадками и термальными источниками магматического, а также их соотношения, указывают на то, что питание гидротермальной системы происходит из гидротермального горизонта под вершиной

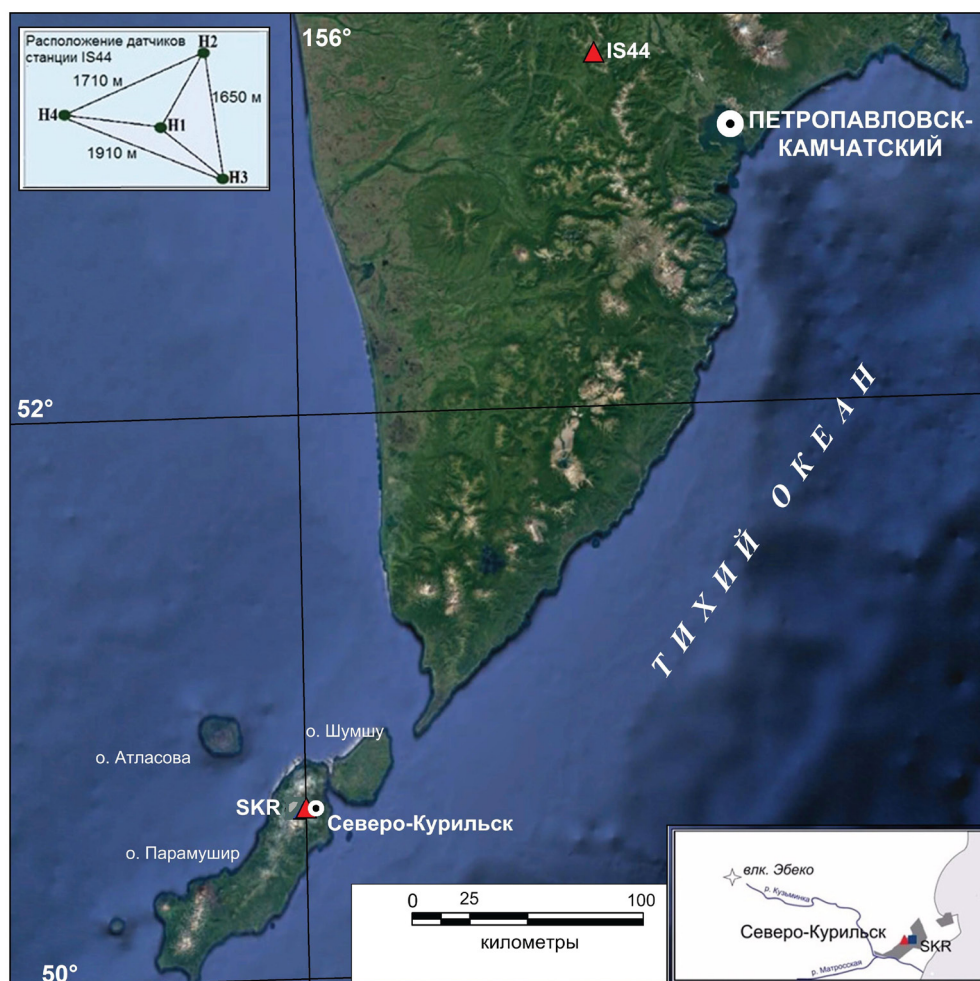


Рис. 1. Расположение острова Парамушир и станции IS44. На верхней врезке показана расстановка микробарографов на IS44, а на нижней врезке схема расположения вулкана Эбеко относительно г. Северо-Курильск. SKR — сейсмостанция «Северо-Курильск».

Fig. 1. Location of Paramushir Island and IS44 station. The upper inset shows the arrangement of microbarographs on IS44, and the lower inset shows the location of Ebeko Volcano in relation to Severo-Kurilsk. SKR — «Severo-Kurilsk» seismic station.

Эбеко с температурой 200–250°C, что является уникальным для Курило-Камчатского региона (Kalacheva et al., 2016).

С начала голоценовой эры все 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 (Котенко и др., 2007, 2010, 2018; Мелекесцев и др., 1993; Рыбин и др., 2017).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА В СЕНТЯБРЕ 2018 г. – АПРЕЛЕ 2019 г.

Извержения вулкана Эбеко, произошедшие в XXI в., описаны в работах (Котенко и др., 2007, 2010, 2018; Рыбин и др., 2017). Последнее извержение, которое продолжается в настоящее

время, началось 8 ноября 2016 г. Слабые эксплозии с различной загруженностью пеплом происходят из различных эруптивных центров как поочередно, так и одновременно (рис. 2 на 1 стр. обложки). Высота эруптивного облака (ЭО) редко превышает 3 км н.у.м., а длительность событий составляет от одной до 40 минут. Сильные пепловые выбросы сопровождаются звуком с низкой частотой, который был слышен на расстояниях до 7 км (Котенко и др., 2018).

Эксплозивная активность вулкана негативно влияет на здоровье жителей г. Северо-Курильска за счет выпадения пепла и периодического превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) таких вулканических газов как SO_2 и H_2S . С целью мониторинга экологической обстановки в г. Северо-Курильск министерством природных ресурсов РФ установлен измерительный комплекс контроля качества атмосферы «СКАТ».

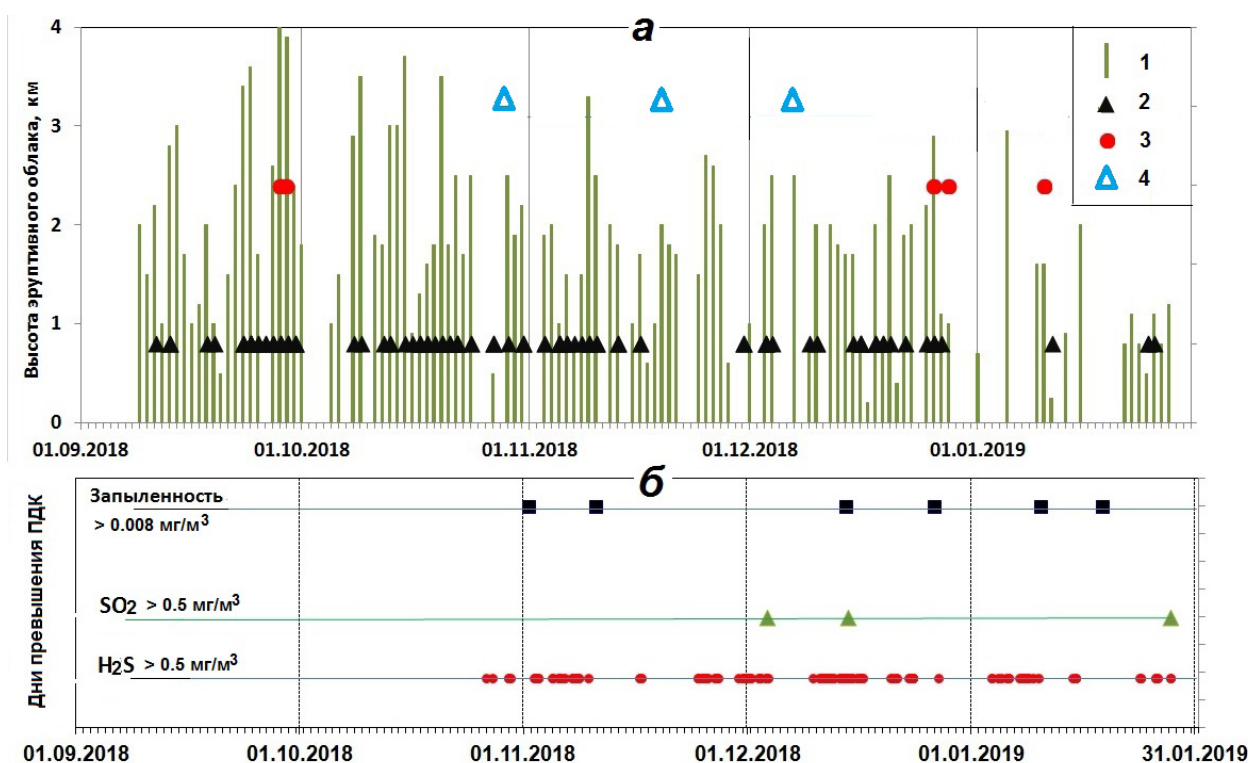


Рис. 3. Высота эруптивных облаков и выпадение пепла в Северо-Курильске (а), превышение предельных концентраций по данным комплекса «СКАТ» (б).

Fig. 3. The height of eruptive clouds and the ashfalls in Severo-Kurilsk (a), exceedence of the maximum concentration according to the SKAT complex (b).

Измерительный комплекс установлен на южной окраине города, на возвышенности (высота 42 м н.у.м.), на расстоянии 800 м от геофизического измерительного комплекса. Информация об активности вулкана по данным визуальных наблюдений с привлечением данных комплекса «СКАТ» за период сентябрь 2018 г. – апрель 2019 г. приведена на рис. 3. Исходя из тенденции уменьшения высоты ЭО с октября 2018 г., можно предположить, что активность вулкана спадает.

Обращает на себя внимание несовпадение дней выпадения пепла и ПДК по запыленности в г. Северо-Курильск. На взгляд авторов, это связано с тем, что «СКАТ» определяет запыленность для частиц размером 1–10 мкм, доля которых при выпадении пепла весьма мала. Но при сильных ветрах в атмосферу может подниматься, так называемый ресуспендированный пепел, возникающий в результате перемыва и переотложения пепла, выпавшего за длительный период извержения.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В настоящее время дистанционный мониторинг активности вулкана Эбеко осуществляется сейсмической станцией Северо-Курильск

(с/с SKR) Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», которая расположена в 7 км от кратера вулкана. С целью комплексного изучения физики взрывного процесса в сентябре 2018 г. на с/с SKR силами Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) был установлен комплект аппаратуры.

Для изучения атмосферно-электрических эффектов, возникающих в эруптивных облаках, на разной высоте на мачте сотовой связи, расположенной рядом со зданием сейсмостанции SKR, были установлены два электростатических флюксметра типа ЭФ-4, позволяющие регистрировать вертикальную составляющую электрического поля атмосферы (E_z ЭПА). Применение мощного малогабаритного вентильного двигателя и поверхностный монтаж, позволили реализовать устройство в прямоугольном корпусе с габаритными размерами 120×200×45 мм (рис. 4а). Прибор обладает низким электропотреблением, что очень важно для создания автономной сети пунктов регистрации E_z ЭПА с целью мониторинга взрывной активности вулканов (Ефимов и др., 2013).

Для регистрации волновых возмущений в атмосфере, возникающих во время взрывов

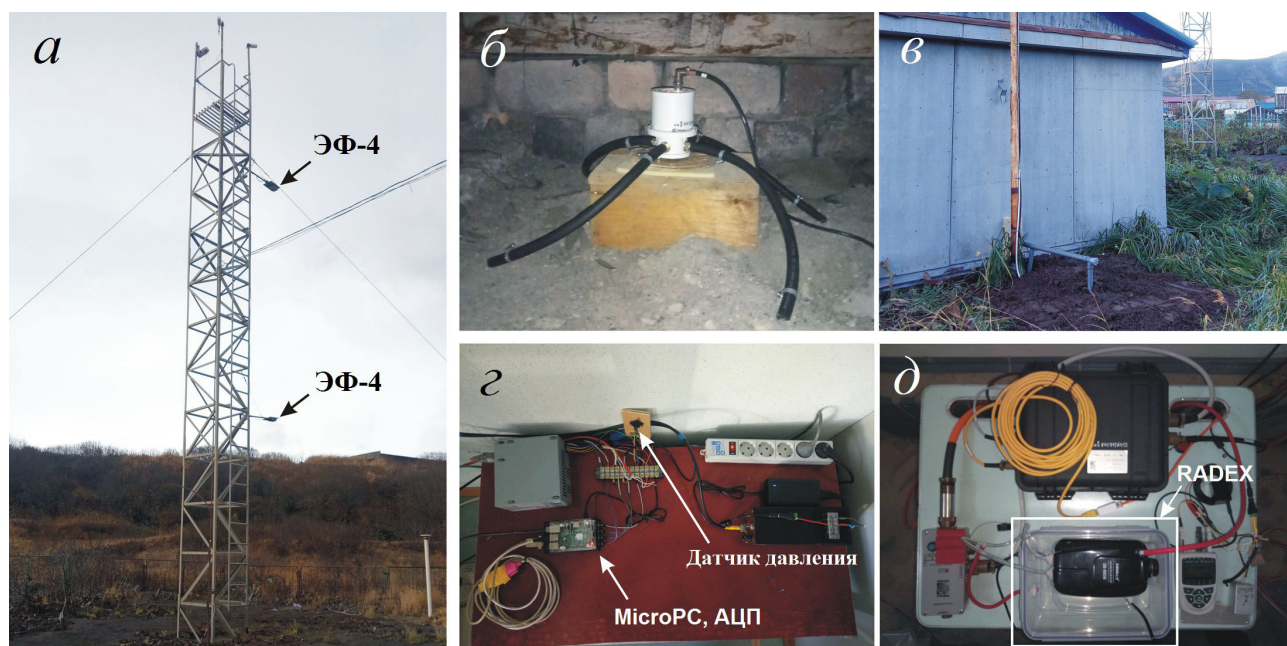


Рис. 4. Размещение дополнительной аппаратуры в пункте SKR с целью регистрации некоторых параметров взрывов вулкана Эбеко и почвенного радона: *а* — вышка, на которой установлены флюксометры; *б* — размещение микробарографа ISGM-03M; *в* — место установки комплекса для регистрации почвенного радона; *г* — датчик давления и микрокомпьютер с АЦП; *д* — радиометр RADEX в составе комплекса для регистрации почвенного радона.

Fig. 4. Sites of additional equipment at SKR installed in order to record certain parameters of the explosions on Ebeko Volcano and subsoil radon: *a* — tower on which fluxmeters are installed; *b* — location of the ISGM-03M microbarograph; *c* — the installation site of the complex for registration of subsoil radon; *d* — pressure sensor and microcomputer with ADC (Analog to Digital Converters); *e* — RADEX radiometer in the complex for registration of subsoil radon.

вулкана Эбеко, на с/с SKR был установлен микробарограф ISGM-03M с полосой регистрации 0.02–10 Гц в диапазоне амплитуд 0.001–100 Па. Общий вид микробарометра ISGM-03M показан на рис. 4б. Следует отметить, что в 302 км от вулкана располагается международная инфразвуковая станция IS44 (рис. 1), позволяющая проводить мониторинг инфразвуковых волн, сопровождающих извержения вулканов Камчатки и Северных Курил.

Для исследования изменений напряженно-деформированного состояния геосреды, обусловленных извержением вулкана Эбеко, рядом с с/с SKR был установлен радиометр RADEX MR107 (фирма ООО «КВАРТА-РАД») для регистрации объемной активности почвенного радона (ОА Rn). Радиометр осуществляет измерение ОА Rn диффузионным методом с одновременной регистрацией температуры и влажности воздуха.

Для мониторинга ОА Rn был применен метод принудительной конвекции, который заключается в откачке почвенного воздуха компрессором из измерительного шпура в накопительную камеру, где установлен радиометр (Козлова, Юрков, 2005). В нашем случае глубина шпура составляла 1.7 м, а поверхность почвы вокруг него была покрыта газонепроницаемым экраном

площадью 4 м², что обеспечивает герметизацию от подсосывания воздуха атмосферы (рис. 4в). Данная методика позволяет значительно снизить уровень помех, связанных с вариациями атмосферного давления. Получаемые данные сохраняются в долговременной независимой памяти радиометра и по запросу оператора с помощью специального программного обеспечения передаются на ПЭВМ.

Ранее уфимскими гидрогеологами в ~500 м от сейсмической станции были пробурены две скважины глубиной ~6 м¹. По литологическому составу пород и их геологическому возрасту в разрезе был выделен водоносный горизонт, который широко развит в пределах всей морской террасы, на которой расположена с/с SKR. Водо-вмещающие отложения мощностью 1.3–3.8 м представлены песками, гравийными грунтами, галечниками, реже суглинками и глинами. Глубина залегания горизонта зависит от рельефа и изменяется от 0.8 до 1.4 м. Так как его питание осуществляется инфильтрацией атмосферных осадков и перетеканием из смежных горизон-

¹ Отчетная техническая документация по инженерно-геологическим изысканиям «Строительство и реконструкция систем энергообеспечения. Северо-Курильск, о. Парамушир». ООО КРЕАТИВ-ГЕО. Уфа. 2014. (Пояснительная записка). 283 с.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

тов и комплексов, то его режим тесно связан с метеорологическими факторами. Разгрузка происходит в направлении местного базиса эрозии — ручья, протекающего в 8.6 м от пункта наблюдений.

Для автоматизации процесса сбора и первичной обработки данных, полученных в процессе мониторинга E_z ЭПА и волновых возмущений в атмосфере, был разработан программно-аппаратный комплекс на основе микрокомпьютера Raspberry и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Lcard E24, имеющего четыре аналоговых входа. Связь с микрокомпьютером Raspberry выполнена по интерфейсу RS232. Функционал Raspberry позволяет производить накопление данных на устройстве, а так же дает возможность удаленного доступа к программной и аппаратной частям комплекса, что повышает эффективность и оперативность его работы.

Программная часть комплекса, реализованная на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python, расположенная на микрокомпьютере ASUS Tinker Board, ожидает ответ с АЦП E-24. Если АЦП доступно, оно передает строку в бинарном виде. Программа преобразует полученные данные в строку UTF8 с помощью библиотеки PyE24 и записывает в файл формата ASCII.

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 грозowymi разрядами, которые, в основном, формируют глобальную электрическую цепь (Мареев, 2010), но на региональном масштабе, на локальное электрическое поле атмосферы могут влиять геодинамические процессы (землетрясения, извержения вулканов) (Чернева, Фирстов, 2018).

Долговременные непрерывные наблюдения за E_z ЭПА, являются экспериментальной основой для исследований локальных электрических эффектов в атмосфере. Эксплозивная активность вулканов, при которой в атмосферу выбрасывается вулканический пепел, образующий эруптивные облака, является одним из локальных источников аэроэлектрических структур.

Вулканические шлейфы, простирающиеся в некоторых случаях на сотни километров, несут мощный электрический заряд, который можно регистрировать приборами наземного

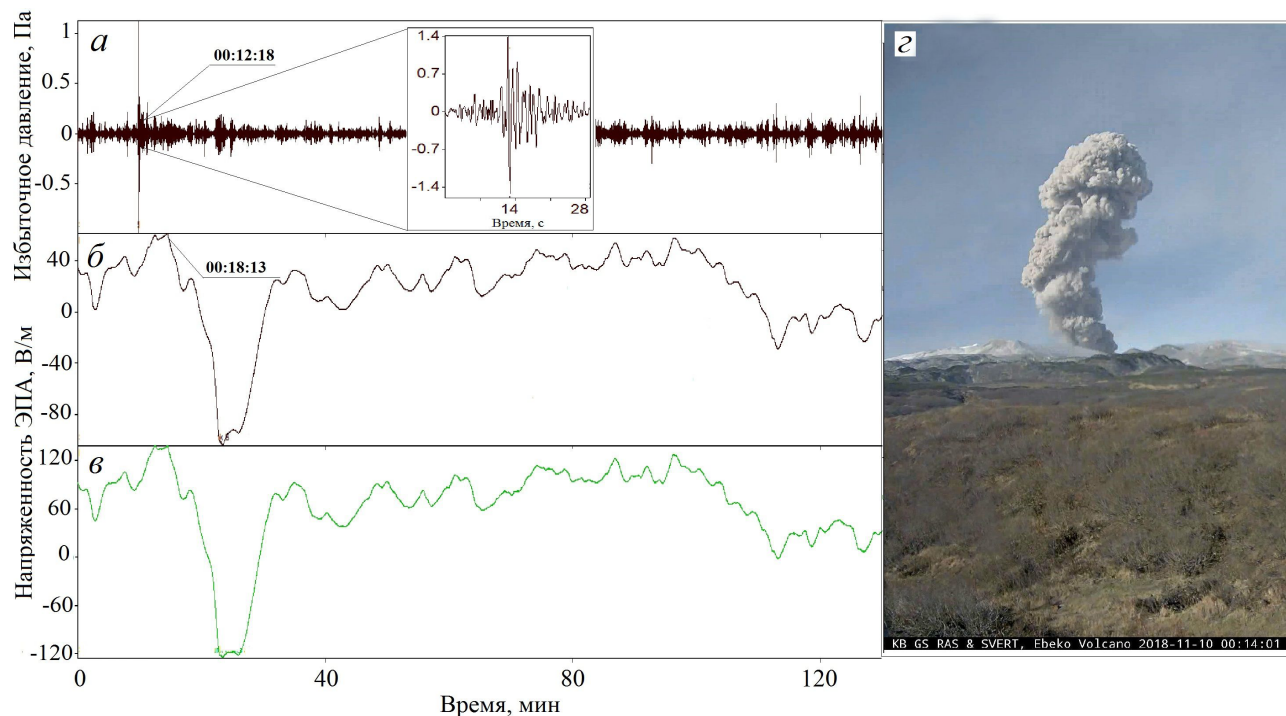


Рис. 5. Фрагмент записи акустического сигнала (а), записи E_z ЭПА с двух ЭФ-4, установленных на высоте 3 м (б) и 6 м (г), при прохождении эруптивного облака от эксплозии вулкана Эбеко 11 ноября 2018 г (з). Начало отсчета времени соответствует 10.11.2018, 00:00:00.

Fig. 5. A fragment of the recording of the acoustic signal (a), the recording of the E_z EFA (electric field of the atmosphere) from two EF-4s installed at a height of 3 m (b) and 6 m (g), while passing through the eruptive cloud from the explosion of Ebeko Volcano on November 11, 2018 (z). Time reference corresponds to 11.10.2018, 00:00:00.

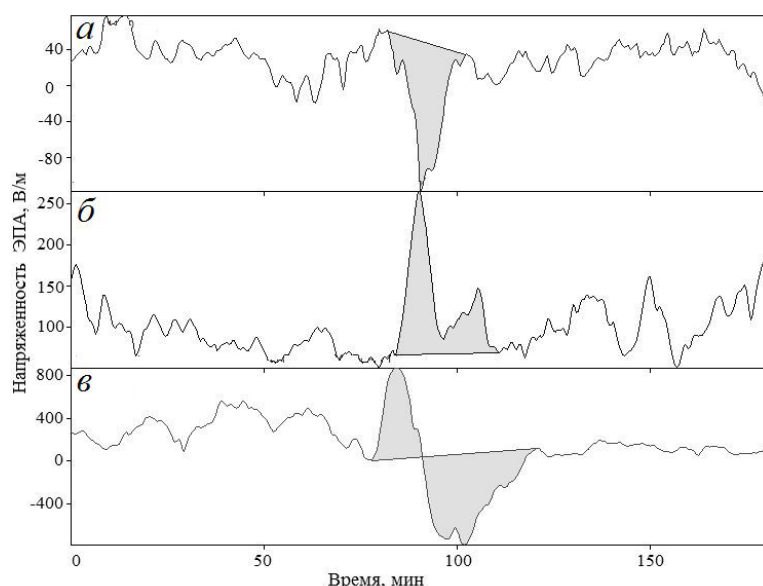


Рис. 6. Примеры откликов E_z ЭПА с отрицательной (а), положительной (б) и биполярной полярностью (в), возникающих при прохождении газо-пепловых облаков от эксплозий вулкана Эбеко в окрестностях SKR. Начало отсчета времени соответствует: а — 09.11.2018, 22:54:31; б — 04.12.2018, 00:16:14; в — 16.03.2019, 04:57:48.

Fig. 6. Examples of E_z EFA (electric field of the atmosphere) responses with negative (a), positive (b) and bipolar polarity (v) arising from the drift of gas-ash clouds from explosions on Ebeko Volcano in the vicinity of SKR. Time reference corresponds to: a — 11/09/2018, 10:54:31 PM; б — 12/04/2018, 00:16:14 AM; в — 16/03/2019, 04:57:48 AM.

базирования. Контролируя E_z ЭПА в приземном слое, можно обнаруживать присутствие ЭО даже слабонасыщенных аэрозольными частицами мелкодисперсного пепла (Mather, Harrison, 2006).

Электризация ЭО вулкана Эбеко проявилась в 47 случаях откликов E_z ЭПА, зарегистрированных в период с 1 октября по 31 марта 2019 г. Селекция полезных сигналов осуществлялась на основании непрерывной съемки вулкана видеокамерой, установленной на с/с SKR, а также по данным микробарографа (рис. 5).

Естественно, эксплозии происходили при различных метеорологических условиях — как в условиях хорошей погоды, так и в сложных метеорологических условиях. Наблюдались также случаи, когда при прохождении пеплового облака в непосредственной близости от пункта наблюдения отклик в E_z ЭПА не регистрировался.

Аномалии в E_z ЭПА, как правило, имели бухтообразную форму обеих полярностей и сравнительно редко в виде биполярного сигнала (рис. 6). Длительность аномалий составляла от 10 до 30 мин со средним значением $E_z \approx 1.0$ кВ/м, а максимальным до 3.0 кВ/м. Основные параметры зарегистрированных сигналов, обусловленных прохождением ЭО, приведены в таблице.

Наблюдение трех типов аномалий в E_z ЭПА при эксплозиях вулкана Эбеко свидетельствует о существенно различном характере эксплозий. Половина эксплозий сопровождаются истечением газовой-пепловой смеси с формированием ЭО, состоящего, преимущественно, из аэрозолей. В 37% ЭО имеют отрицательный заряд, что, по-видимому, связано с преобладанием в них пепла. На рис. 5 показано, что ЭО от эксплозии, сопровождавшейся воздушной ударной волной, т.е. взрывного типа, имеет отрицательный заряд. В 6 случаях (13%) ЭО формируют сигнал, характерный для движущегося над пунктом

регистрации диполя, с осью ориентированной вдоль движения ЭО (Чернева, Фирстов, 2018). Причем первый заряд «+», а второй «-», что может свидетельствовать о начале эксплозии в виде газовой-пепловой струи на начальном участке с последующим ее насыщением пеплом, что приводит к формированию дипольного заряда. В этом заключается специфика эксплозий вулкана Эбеко, т.к. для эксплозивных извержений андезитовых вулканов, как правило, полярность ЭО формируется на первом этапе пеплом, возникшим в результате фрагментации магмы, со знаком «+» (Фирстов и др., 2017, 2019).

Исходя из допущений, что ЭО проходит непосредственно над пунктом на высоте около $z \approx 2$ км (согласно рис. 2), сделаем усредненные оценки заряда ЭО используя зависимость $E_z = 2q/4\pi\epsilon_0 z^2$, где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл/В·м, электрическая постоянная.

Наблюдаемые ЭО эксплозий вулкана Эбеко в рассмотренный период имели слабый заряд

Усредненные параметры отклика в E_z ЭПА, зарегистрированного в SKR, при прохождении эруптивных облаков от извержений вулкана Эбеко за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2019 г.

Averaged response parameters in the E_z EFA (electric field of the atmosphere) recorded in SKR during the passage of eruptive clouds from eruptions of the Ebeko volcano for the period from October 1, 2018 to March 31, 2019.

Пункт наблюдения SKR			
Полярность сигнала	"+"	"-"	"±"
Количество случаев	23	18	6
Средняя амплитуда, кВ/м	0.73 ± 0.46	0.89 ± 0.44	1.42 ± 0.75 0.78 ± 0.36
Средний заряд, Кл	0.016	0.019	0.031 0.017

в сотые доли Кл (таблица). По-видимому, это является свидетельством особых условий возникновения взрывов и, возможно, связано с фреатомагматическим характером извержения.

Натурные данные откликов в E_z ЭПА при прохождении ЭО от взрывных извержений являются основой для изучения их аэроэлектрической структуры, обусловленной выносом материала различного генезиса в атмосферу при взрывных извержениях.

АКУСТИЧЕСКОЕ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ЭКСПЛОЗИВНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВУЛКАНА

Сейсмическое и акустическое излучения используются как результативные источники для дистанционного мониторинга вулканических извержений. Как было показано в работе (Фирстов, 2003) при внезапных вулканических выбросах взрывного типа (взрывов) возникают слабые воздушно ударные волны (ВУВ). По мере их распространения они эволюционируют и превращаются в акустические инфразвуковые волны.

На с/с SKR взрывные землетрясения (ЭЗ) регистрировались только от наиболее сильных взрывов. Причем уверенно их выделять удавалось на записях велосиграфа путем сопоставления с записями ВУВ микробарографом

(рис. 7). В то время как акустические сигналы (АС) при благоприятных метеорологических условиях фиксировались даже в дальней зоне на IS44.

На станции IS44 АС с азимутом на вулкан Эбеко представляли собой цуги колебаний с периодом $T_{cp} \approx 1.0$ с и длительностью до 20 с (рис. 8а). Максимальная амплитуда избыточного давления (ΔP_{max}) в сигналах не превышала 0.03 Па (Лобачева, Будиллов, 2019). В ближней зоне сигнал представлял биполярный хорошо сбалансированный импульс с $T_{cp} \approx 0.8$ с, который можно отнести к слабой ВУВ (рис. 8б). Запоздывание между приходами сигналов на обе инфразвуковые станции составляло 00:16:02, что при скорости звука ~ 300 м/с свидетельствовало о едином источнике излучения.

При сравнительно близком расстоянии микробарографа от источника ($r = 7.2$ км), на основании ВУВ можно оценить тротильный эквивалент взрывов (Q , кг) на основании эмпирических зависимостей от накладных взрывов. Тротильный эквивалент служит относительной энергетической мерой, которая показывает, сколько нужно использовать взрывчатого вещества (тринитротолуола), чтобы получить ВУВ с параметрами, близкими к экспериментальным. В связи с тем, что длительность фазы сжатия (τ_+) при «вулканических взрывах» (взрывов) формируется размером кратера, то для них Q

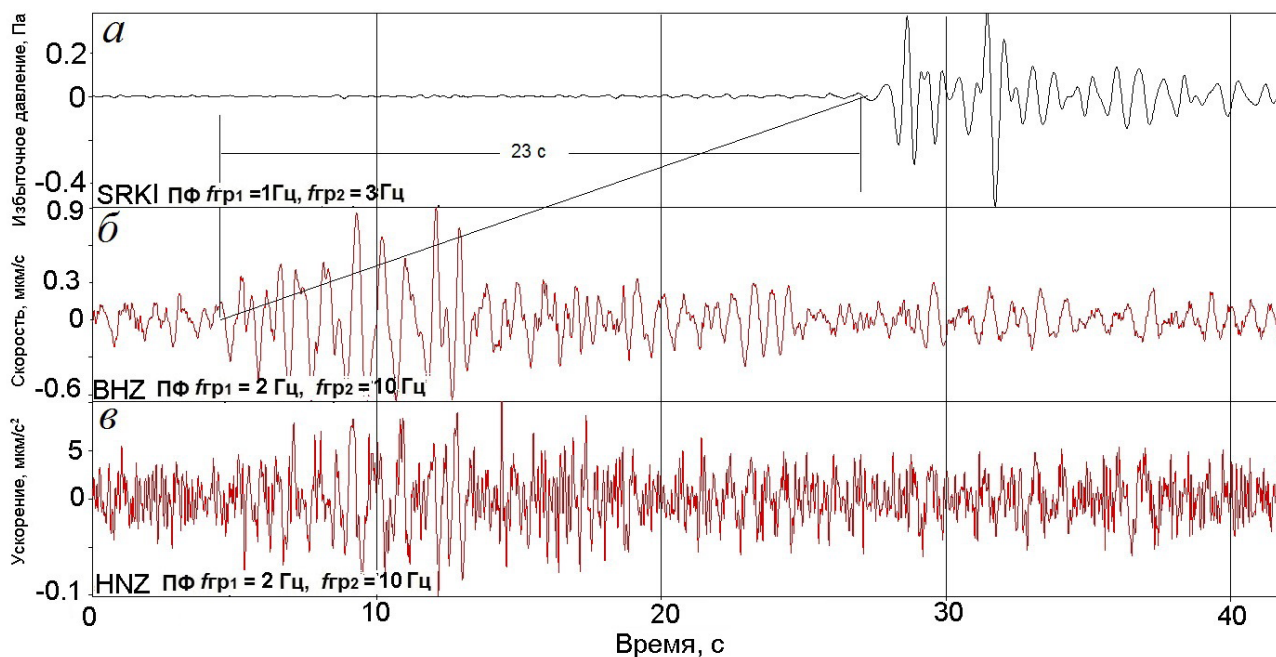


Рис. 7. Фрагмент барограммы с записью ВУВ (а) и запись соответствующего взрывного землетрясения велосиграфом (б) и акселерометром (в). Начало отсчета времени соответствует 16.11.2018, 16:35:18.

Fig. 7. A fragment of the barogram with the recording of the ABW (Air Blast Wave) (a) and the recording of the corresponding explosive earthquake with the bicycle digraph (b) and the accelerometer (c). Time reference corresponds to 11.16.2018, 16:35:18.

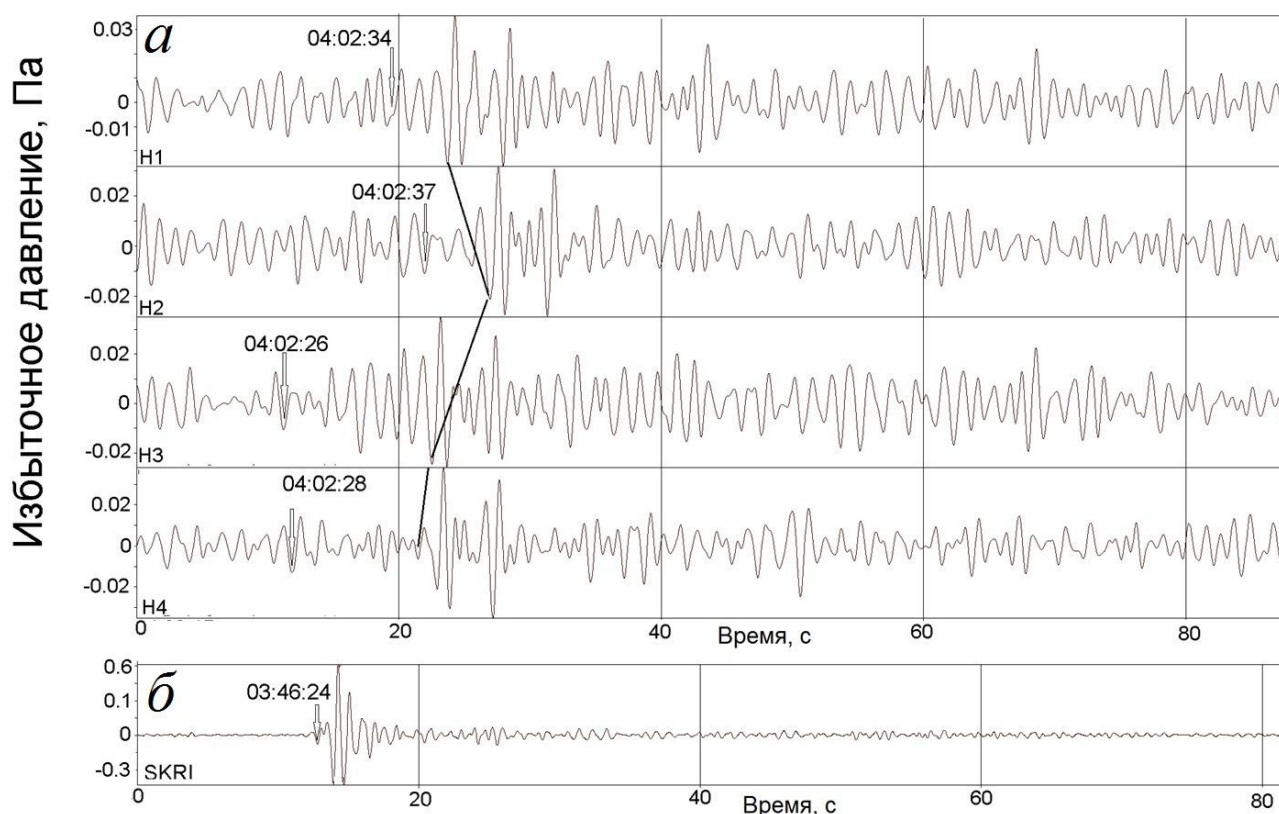


Рис. 8. Запись воздушной волны на станциях IS44 (а) и SKR (б), возникшей в результате эксплозии на вулкане Эбеко. Начало отсчета времени соответствует 05 января 2019 г. а — 04:02:15, б — 03:46:15.

Fig. 8. Air wave recording at IS44 (a) and SKR (b) stations caused by the explosion on Ebeko Volcano. Time reference corresponds to January 5, 2019 а — 04:02:15 AM, б — 03:46:15 AM.

следует определять не по избыточному давлению (ΔP , Па), а по импульсу:

$$I_+ = \int_0^{\tau_+} \Delta P(t) dt \text{ [Па} \cdot \text{с]} \text{ (Фирстов, 2003).}$$

Зависимость между энергией взрыва и импульсом определяется формулой $I_+ = 220 \cdot Q^{2/3} / r$ (Цейтлин, Смолий, 1981), отсюда следует, что для наиболее сильных эксплозий в рассматриваемый период величина тротилового эквивалента не превышала 100 кг тринитротолуола.

ВАРИАЦИИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА

На динамику ОА Rn существенное влияние оказывают вариации метеорологических величин (Фирстов, Макаров, 2018). При этом сезонный ход возникает за счет изменения температуры воздуха, а низкочастотные возмущения возникают в результате вариаций атмосферного давления. На фоне помех довольно сложно выделить полезный сигнал, связанный с изменением напряженно-деформированного состояния среды, обусловленного геодинамическими процессами. В данной работе приводятся результаты мониторинга ОА Rn за период 01.10.2018 г. – 30.06.2019 г. с целью изучения влия-

ния вариаций метеорологических величин на ее динамику.

Согласно гидрогеологическим условиям пункта регистрации отбор почвенного воздуха производится в верхней части водовмещающих пород водоносного горизонта, т.е. в зоне полного влагонасыщения (Фирстов, Макаров, 2018). На кривой ОА Rn можно выделить элементы сезонного хода, которые хорошо коррелируются с температурой атмосферного воздуха, что позволяет разбить весь период наблюдений на три участка: I — осенний, II — зимний, III — весенний (рис. 9а, 9б). На участках I и III среднее значение ОА Rn составляет ~2 кБк, а в зимний период возрастает в ~1.5 раза. Это связано с промерзанием верхнего слоя грунта в зимнее время, что ведет к уменьшению его проницаемости и, соответственно, к увеличению ОА Rn в зоне влагонасыщения за счет уменьшения конвективной составляющей (рис. 9а).

При положительных температурах атмосферного и заборного воздуха регистрировались четко выраженные суточные колебания, как температуры, так и влажности заборного воздуха. По аналогии с предшествующими наблюдениями (Фирстов, Макаров, 2018), это можно отнести за счет суточных колебаний уровня воды в ручье,

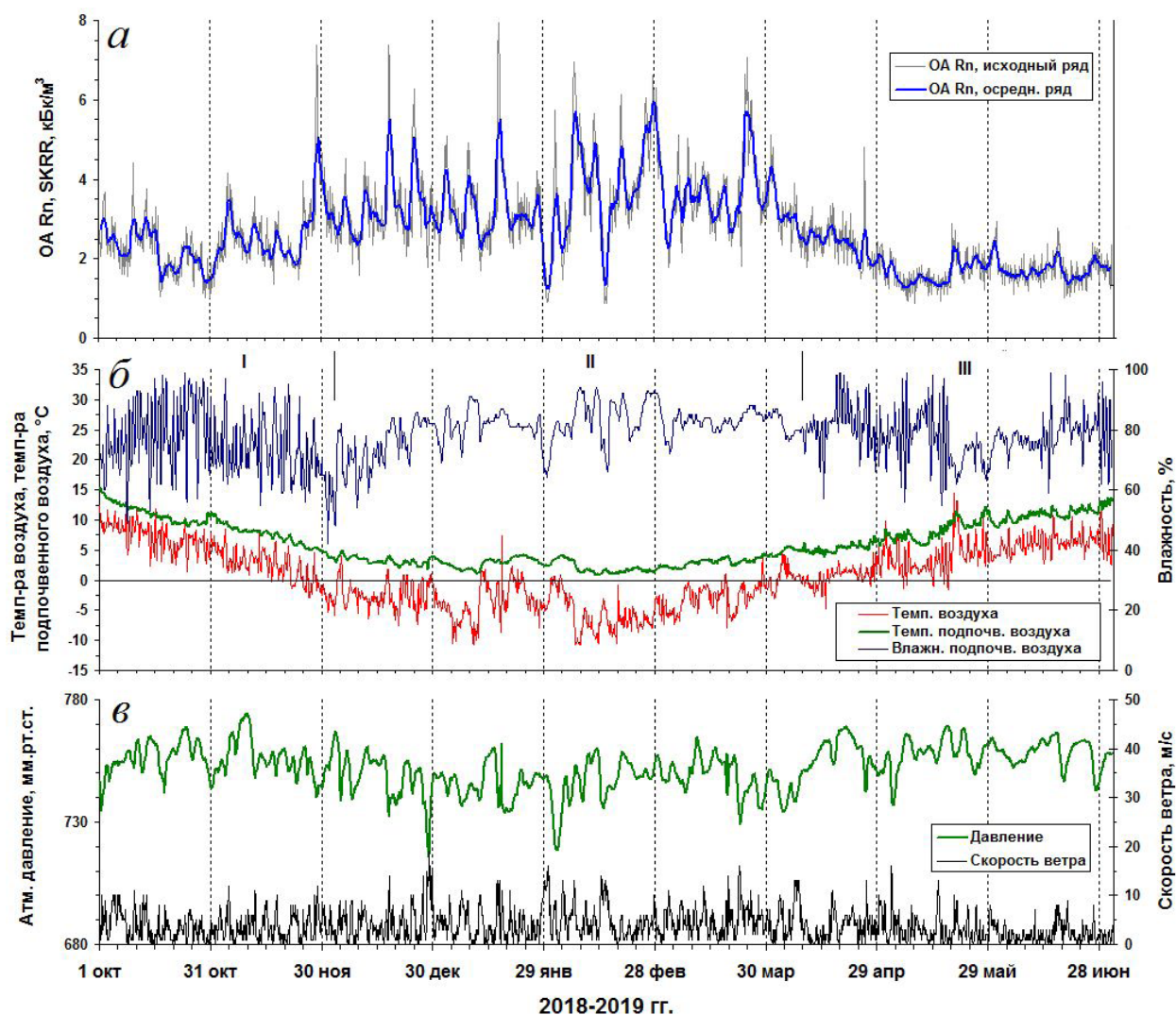


Рис. 9. Динамика OA Rn в пункте SKR (а), влажность, температура заборного воздуха, и температура атмосферного воздуха (б), атмосферное давление и скорость ветра (в) в районе г. Северо-Курильск за период 01.10.2018 г. – 30.06.2019.

Fig. 9. Dynamics of VA (volumetric activity) of Rn in SKR (a), humidity, intake air temperature, and atmospheric air temperature (б), atmospheric pressure and wind speed (в) within Severo-Kurilsk for the period October 1, 2018 – June 30, 2019.

расположенного достаточно близко (8.6 м) от пункта регистрации.

В зимний период при отсутствии суточных вариаций визуально видна хорошо выраженная корреляция OA Rn с влажностью заборного воздуха (коэффициент корреляции $\rho = 0.62$), что характерно для зоны влагонасыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты комплексных наблюдений за активностью вулкана Эбеко в конце 2018 г. и начале 2019 г. показали, что эруптивные облака от отдельных эксплозий достаточно часто проходят вблизи г. Северо-Курильск и имеют отклик в вертикальной составляющей электрического поля атмосферы. Три типа аномалий в поле E_z ЭПА свидетельствуют о различ-

ном механизме отдельных эксплозий вулкана Эбеко.

Регистрация АС в близкой зоне к источнику дает качественную картину развития эксплозии и оценку тротилового эквивалента, который для наиболее сильных эксплозий составил ~100 кг ТНТ.

В поле подпочвенного радона влияние напряженно-деформированного состояния геосреды, связанного с активностью вулкана, не выявлено. Обнаружены определенные закономерности в динамике OA Rn, связанные с вариациями метеорологических величин.

Анализ полученных результатов дает основание говорить, что вулкан Эбеко представляет собой природную лабораторию для изучения механизма извержений. С целью получения более детальных данных о механизме извержений вулкана Эбеко и сопровождающих их

атмосферно-электрических явлений, возникающих в процессе формирования и распространения ЭО, планируется установить в пункте SKR ОНЧ-пеленгатор для регистрации вулканических гроз, а в непосредственной близости от кратера (1.5–2 км) сейсмическую станцию.

Авторы выражают огромную благодарность за содействия в установке аппаратуры и помощь в проведении полевых исследований Л.В. Котенко, сотрудникам сейсмостанции Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» Г.И. Горюновой, Н.А. Марьясовой, Д.Д. Крыловой, Т.А. Караченко.

Работа выполнялась в рамках государственного задания по проекту АААА-А19-119031590060-3 и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 18-35-00175, 20-05-00493.

Список литературы [References]

- Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / Отв. ред. О.Л. Гуськова, А.К. Манштейн. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 269 с. [Gas hydrothermal active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis / Ed. ed. O.L. Guskova and A.K. Manstein. Novosibirsk: INGG SB RAS, 2013. 269 p. (in Russian)].
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с. [Gorshkov G.S. Volcanism and the Upper Mantle: Investigations in the Kurile Island Arc. Plenum Press: New York and London, 1970. 385 p.].
- 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 [Efimov V.A., Oreshkin D.M., Firsov P.P., Akbashev R.R. EF-4 Electromagnetic Fluxmeter for Studies of Geodynamic Processes. Seismic Instruments. 2014. V. 50. № 3. P. 230–237. <https://doi.org/10.3103/S0747923914030050>].
- Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 7. С. 31–34 [Kozlova I.A., Yurkov A.K. Methodological issues of measuring the content of radon-222 in soil air during monitoring observations // Ural Geophysical Bulletin. 2005. № 7. P. 31–34 (in Russian)].
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Извержение вулкана Эбеко в январе – июне 2009 г. (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 16. С. 57–68 [Kotenko T.A., Kotenko L.V., Stanimirova E.I. et al. The eruption of the Ebeko volcano in January – June 2009 (Paramushir Island, Kuril Islands) // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2010. № 1(16). P. 57–68 (in Russian)].
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (остров Парамушир, Северные Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 3–13 [Kotenko T.A., Kotenko L.V., Shapar V.N. Activation of Ebeko volcano in 2005–2006 (the Paramushir Island, North Kuril Islands) // Vulkanologia i Seismologia. 2007. № 5. P. 3–13 (in Russian)].
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 32–42 [Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. Eruptions of the Ebeko volcano (Kuril Islands) in 2016–2017 // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2018. № 1(37). P. 32–42 (in Russian)].
- Лобачева М.А., Будилов Д.И. Активность вулкана Эбеко по сейсмическим и акустическим излучениям во второй половине 2018 г. // Материалы XX Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь, 18–22 марта 2019 г. / Пермь: ГИ Уро РАН, 2019. С. 136–140 [Lobacheva M.A., Budilov D.I. Activity of the Ebeko volcano in seismic and acoustic emissions in the second half of 2018 / Materials of the 20th Ural Youth Scientific School of Geophysics, March 18–22, 2019. Perm: GI URO RAN, 2019. P. 136–140].
- Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–533 [Mareev E.A. Achievements and prospects of research of the global electric circuit // UFN. 2010. V. 180. Iss. 5. P. 527–533].
- 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 [Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Kiryanov V.Yu. et al. Ebeko volcano, Kuril Islands: eruptive history and a potential hazards. Pt. 2 // Vulkanology and Seismology. 1994. V. 15. № 4. P. 411–430].
- Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2017. № 1. Вып. 33. С. 83–88 [Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. The activity of the volcanoes of the Kuril Islands in 2016 // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2017. № 1(33). P. 83–88 (in Russian)].
- Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф. и др. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минералорудообразования в ее недрах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 3–21 [Rychagov S.N., Belousov V.I., Glavatskikh S.F. et al. The North Paramushir magmatic-hydrothermal system: the deep geologic section and a model of the present day mineralization and metallization in the interior of the system // Vulkanologiya i Seismologiya. 2002. № 4. P. 3–21 (in Russian)].
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 239 с. [Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. Vulkanizm Kurilskoi ostrovnnoi dugi: geologiya i petrogenesis. M.: Nauka, 1989. 239 p. (in Russian)].
- Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0–10 Гц и их связь с взрывным

- процессом. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 90 с. [Firstov P.P. Volcanic acoustic signals in the range 1.0–10 Hz and their relation to the explosive process. Petropavlovsk-Kamchatsky: KGPU, 2003. 90 p.].
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2018. 155 с. [Firstov P.P., Makarov E.O. The dynamics of subsoil radon in Kamchatka and strong earthquakes. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU, 2018. 155 p.].
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0002351517010060> [Firstov P.P., Akbashev R.R., Holzworth R. et al. Atmospheric-electrical effects during the explosion of the Shiveluch volcano on November 16, 2014 // Izvestiya RAN. FAO. 2017. V. 53. № 1. P. 29–37. <https://doi.org/10.1134/S0001433817010066>].
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А. и др. Электризация эруптивных облаков вулкана Шивелуч в зависимости от характера эксплозии // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019349-62> [Firstov P.P., Akbashev R.R., Zharinov N.A. et al. Electrification of Eruptive Plumes Discharged by Shiveluch Volcano in Relation to the Character of the Responsible Explosion // Journal of Volcanology and Seismology. 2019. V. 13. № 3. P. 172–184. <https://doi.org/10.1134/S0742046319030035>].
- Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. 192 с. [Zeitlin Y.I., Smoly N.I. Seismic and shock air waves of industrial explosions. Moscow: Nedra, 1981. 136 p. (in Russian)].
- Чернева Н.В., Фирстов П.П. Формирование локального электрического поля атмосферы на Камчатке под влиянием природных процессов. Владивосток: Дальнаука, 2018. 127 с. [Cherneva N.V., Firstov P.P. The formation of a local electric field of the atmosphere in Kamchatka under the influence of natural processes. Vladivostok: Dalnauka, 2018. 127 p. (in Russian)].
- Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano–hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 310. P. 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.006>.
- Mather T.A., Harrison R.G. Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. Iss. 4. P. 387–432. <https://doi.org/10.1007/s10712-006-9007-2>.
- Miura T., Koyaguchi T., Tanaka Y. Measurements of electric charge distribution in volcanic plumes at Sakurajima volcano Japan // Bulletin of Volcanology. 2002. V. 64. Iss. 2. P. 75–93. <https://doi.org/10.1007/s00445-001-0182-1>.

GEOPHYSICAL OBSERVATIONS OF THE EBeko VOLCANO'S ERUPTION (PARAMUSHIR ISLAND, RUSSIA) OVER THE PERIOD SEPTEMBER 2018 – APRIL 2019

P.P. Firstov^{1, 2}, R.R. Akbashev^{1, 3}, E.O. Makarov^{1, 3}, T.A. Kotenko²,
D.I. Budilov¹, M.A. Lobacheva¹

¹Kamchatka branch of the federal research center «United geophysical survey, RAS»,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006

²Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006

³Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683032

The paper presents the results of integrated geophysical observations of the Ebeko Volcano's activity in late 2018 and early 2019. The instrument complex for observation was located at the Severo-Kurilsk seismic station at a distance of 7.2 km far from the volcanic crater. Three types of response in the vertical component of the electric field of the atmosphere have been distinguished during the drift of eruptive clouds from the Ebeko Volcano's explosions, which gives evidence for various mechanisms of their occurrence. The registration of infrasonic acoustic signals in the near zone made it possible to estimate the trinitrotoluene equivalent for the strongest explosions, which was calculated to be about 100 kg of trinitrotoluene. The authors have revealed certain regularities in the dynamics of the volumetric activity of radon, associated with variations in meteorological values and hydrological features of the registration point. A long period of its activity and the proximity of the observation point to the crater give reason to suggest Ebeko Volcano to be a natural laboratory for studying the mechanisms of eruptions.

Keywords: volcano, hydrothermal eruption, aerelectric structures, acoustic, seismic radiation.