

## XXII.D.469 – Характеристики вулканических электрических разрядов и вистлеров

Малкин Е. И., Чернева Н. В., Шевцов Б.М., Казаков Е.А.  
Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия

Представлены результаты наблюдения атмосфериков и вистлеров, инициированных высотными электрическими разрядами, возникшими при извержении камчатских вулканов Безымянный и Шивелуч (Россия) 7 и 10 апреля 2023 года. Регистрация атмосфериков и связанных с ними вистлеров осуществлялась ОНЧ-пеленгатором. Вистлеры, рожденные на Камчатке, определялись по коэффициенту дисперсии, который соответствовал двойному проходу сигнала от Камчатки до Австралии и обратно. Высоты электрических разрядов определялись посредством интерферограмм прямых и отраженных от ионосферы радиолучей атмосферика. Получено высотное распределение электрического разряда, проникновение которого в ионосферу ответственно за генерацию вистлеров. Характеристики вулканических электрических разрядов и вистлеров могут использоваться для оценки высоты эксплозивного извержения.

Всемирная сеть локаций гроз WWLLN (World Wide Lightning Location Network) используется для обнаружения и сопровождения эруптивных облаков (James,2008; Ewert,2010; Shevtsov,2016; VanEaton,2016; Briggs,2022). По интенсивности грозовой активности можно судить о мощности извержения. Автоматическая система обнаружения и анализа вистлеров AWDANet (Automatic Whistler Detector and Analyzer Network) позволяет определять вистлеры, которые рождаются над эруптивными облаками, уходят в магнитно сопряженную точку и возвращаются. Генерация вистлеров связана с высотными грозовыми электрическими разрядами, отношение числа которых к общему числу вулканических грозовых электрических разрядов позволяет судить о динамике формирования эруптивных облаков и высоте подъема эруптивного материала. Форма сигнала ОНЧ-радиопеленгатора позволяет определить высоту грозового разряда. WWLLN, AWDANet и ОНЧ-радиопеленгатор в комплексе дают наиболее полную картину радиоизлучений вулканической грозовой активности.

### Регистрация вулканических свистов

Сравнительно недавно появились результаты исследований связи свистящих электромагнитных излучений очень низкой частоты (ОНЧ) с вулканическими грозовыми разрядами (Collier,2010; Antel,2014). В этих публикациях представлен анализ нескольких извержений вулканов Окмок и Редут (Аляска). При анализе извержений вулканов Безымянный и Шивелуч на Камчатке (Россия) в апреле 2023 года также обнаружена связь между молниями и свистами, зарегистрированными ОНЧ-пеленгатором на станции «Karymshina».

По данным комплексного мониторинга за вулканами КФ ФИЦ ЕГС РАН на вулкане Безымянный 7 апреля 2023 года в 00:43; 04:00; 04:45 UT происходили серии поверхностных событий продолжительностью 3-6 минут. В 5:34 UT началось пароксизмальное эксплозивное извержение продолжительностью 16 минут с максимальной высотой подъема эруптивного облака до 9.2 км над уровнем моря (до 10 км по спутниковым данным Himawari-9). Спустя полчаса, с 06:00 до 24:00 следовали серии поверхностных событий, сопровождавшиеся газо-пепловыми выбросами на высоту 5 км н.у.м. ОНЧ-комплексом фиксируется увеличение электромагнитного излучения в направлении на вулкан Безымянный.

10 апреля 2023 г. активизировался вулкан Шивелуч. В 13:07 UT 10 апреля началось эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, сильно разрушившее лавовый купол в его кратере. По данным спутника Himawari-9 в 20:30 UT 10 апреля эруптивное облако поднялось примерно до 20 км. Эксплозивное извержение продолжалось непрерывно 3 дня, с 10 по 13 апреля. Динамика развития пепловых и аэрозольных облаков этого извержения представлена на анимациях, построенных на основе данных спутника Himawari-9 в период с 08:00 UTC 10 апреля до 07:50 UT 14 апреля [http://d33.infospace.ru/jr\\_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm](http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm). Подробное описание извержения дано в работах (Гирина,2023; Malkin,2023).

По данным ОНЧ-пеленгатора начало грозовой активности совпадает с данными спутника Himawari-9. Резкое увеличение молниевой активности 10 апреля 2023 года соответствует эксплозии 17:44, 18:46, 19:14, зафиксированным сейсмостанцией BDR. Общее количество разрядов при извержении вулкана Шивелуч достигло 26101 разряда по данным ОНЧ-пеленгатора (Malkin,2023) в то время, как WWLLN зарегистрировала всего 132 разряда. Такое различие обусловлено особенностью регистрации грозовых разрядов сетью WWLLN.

Основная часть радиоимпульсов, сопровождающих вулканическую грозу, состоит из одиночных, коротких по длительности, ОНЧ-сфериков (~97%) и только 3% ОНЧ-сфериков представляют собой классическую молнию с лидером и КНЧ-сфериком. WWLLN может определять только эти 3% классических молний, в то время как метод однолучевой пеленгации, использующийся в данном исследовании для распознавания гроз эруптивного облака, отслеживает все радиоимпульсы, что позволяет определить его размеры и отследить перемещение.

По данным WWLLN во время извержений 07.04.2023 и 10.04.2023 в магнитно сопряженном регионе Австралии наблюдалась грозовая активность. Максимум грозовой активности 7 апреля 2023 года у берегов Австралии совпал с периодом вулканической активности при извержении вулкана Безымянный. Поэтому ОНЧ-пеленгатором на Камчатке регистрировались как прямые из Австралии, так и отраженные от Австралии свисты. Зарегистрированные свисты от грозовых разрядов австралийского грозового очага 07.04.2023 во время извержения вулкана Безымянный показаны в координатах  $(f, t)$  на рисунке 1, а и в координатах  $(f^{-1/2}, t)$  на рисунке 1, б.

07.04.2023 05:51:15.801119

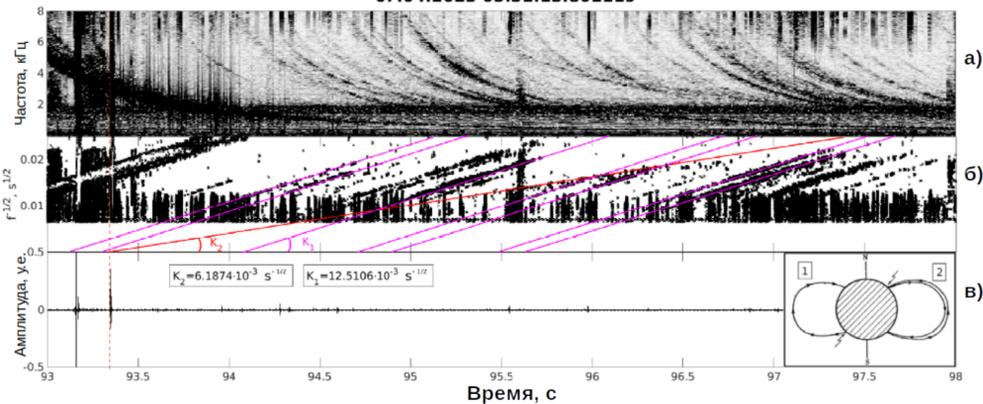


Рис.1 - Пиковые частоты сигнала вертикальной электрической компоненты ОНЧ-пеленгатора при извержении 07.04.2023 вулкана Безымянный: (а) - свисты, инициированные грозовыми разрядами от австралийского грозового очага и эруптивного облака в координатах  $(f, t)$ ; (б) - в координатах  $(f^{-1/2}, t)$ ; (в) -- атмосферик инициирующего грозового разряда вулканического происхождения. Коэффициенты наклона  $K_1$  и  $K_2$  показаны на рисунке. На врезке показана модель распространения электромагнитной волны по волноводу согласно (Storey,1953). Время в секундах от начала записи, указанного на рисунке

Модель генерации свиста, предложенная в (Storey,1953), предполагает, что свист, обнаруженный на земле, возникает в результате разряда молнии в магнитно сопряженной точке, а за счет многократного отражения на границах магнитосферного волновода образуется эхо с коэффициентами наклона прямой  $K_1=K/i$ , в которых  $K=D^{-1/2}$ , где  $i$  - число проходов по магнитосферному каналу,  $D$  - коэффициент дисперсии. Согласно работе Storey, длинные свисты с меньшим коэффициентом  $K_2$  являются рожденными на Камчатке и отраженными в Австралии. Они проходят двойное расстояние по магнитосферному каналу от Камчатки до Австралии и обратно. При возникновении мощного грозового разряда рядом со станцией регистрации на Камчатке во время извержения вулкана должно наблюдаться эхо из Австралии с коэффициентом наклона прямой  $K_2$  в половину от коэффициента  $K_1$  свиста, инициируемого в магнитно сопряженном регионе Австралии (схемы на врезках рисунков 1 и 2).

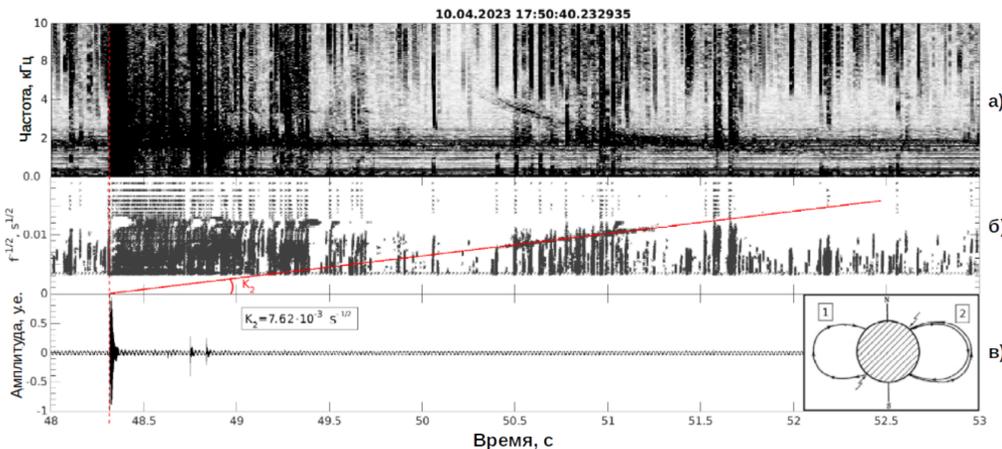


Рис.2 - Пиковые частоты сигнала вертикальной электрической компоненты ОНЧ-пеленгатора при извержении 10.04.23 вулкана Шивелуч: (а) - свисты, инициированные грозовыми разрядами от австралийского грозового очага и эруптивного облака в координатах  $(f, t)$ ; (б) - в координатах  $(f^{-1/2}, t)$ ; (в) -- атмосферик инициирующего грозового разряда вулканического происхождения. Коэффициенты наклона  $K_2$  показаны на рисунке. На врезке показана модель распространения электромагнитной волны по волноводу согласно (Storey,1953). Время в секундах от начала записи, указанного на рисунке

Для всех событий извержения вулкана Безымянный 07.04.2023 были обнаружены свисты с коэффициентами наклона прямых  $K_1=(12.5\pm 1.5)\cdot 10^{-3}c^{-1/2}$  и  $K_2=(6.2\pm 1.5)\cdot 10^{-3}c^{-1/2}$ . Свисты с коэффициентами  $K_1$  на рисунке 1 являются ни чем иным, как свистом из грозового очага Австралии. На этот факт указывает отсутствие в записях ОНЧ пеленгатора инициирующего разряда. Напротив, свист с коэффициентами наклона прямой  $K_2$  имеет инициирующий разряд, из чего можно заключить, что этот свист сгенерирован на Камчатке высотным разрядом эруптивного облака.

Аналогичная картина наблюдалась и для извержения вулкана Шивелуч 10.04.2023. На рисунке 2 показан свист с  $K_2=(7.6\pm 1.5)\cdot 10^{-3}c^{-1/2}$  и инициирующий атмосферик (рисунок 2, в). Отличительной особенностью данного извержения является то, что не наблюдаются парные разряды, подобно тем, что были зарегистрированы 07.04.2023.

Анализ данных извержений вулканов Безымянный и Шивелуч за длительный период показал, что механизмы извержений этих вулканов различны, предварительное описание дано в работах (Firstov,2020, Firstov,2021). В событиях 7 и 10 апреля 2024 года наблюдаются особенности динамики двух различных сценариев развития вулканических гроз, связанных с образованием эруптивной колонны и эволюцией эруптивного облака: по «мягкому» сценарию у Безымянного, у которого эруптивное облако не достигает высот тропопазы, и «жесткому» сценарию с выбросом заряженных отрицательных частиц в стратосферу при извержении вулкана Шивелуч.

7 апреля 2023 году при извержении вулкана Безымянный заряженные пепловые частицы поднялись до высоты 10 км, при этом произошло образование положительного аэрозоля на верхней кромке эруптивного облака, что препятствовало возникновению высотных разрядов. В этом случае мы наблюдаем множественные парные разряды, первый из которых разряд облако-земля, а второй ионосфера-облако. Отрицательный заряд на верхней кромке эруптивного облака при извержении вулкана Шивелуч 10 апреля 2023 года формируется непосредственно взрывом с выносом отрицательных частиц до высоты 20 км, что сразу приводит к образованию высотного разряда.

Так же стоит отметить, что вертикальная электрическая компонента ОНЧ-пеленгатора для всех без исключения инициирующих разрядов имела положительную начальную фазу первой полуволны (рисунки 1 и 2, в).

В течение активной фазы эксплозии вулкана Шивелуч зарегистрировано 43 свистящих атмосферика, 25 из которых имеют коэффициент наклона прямой  $K_2$  (рисунок 2,б) – это камчатские свисты. Для остальных восемнадцати с  $K_1=(16\pm 2.7)\cdot 10^{-3}c^{-1/2}$  - австралийские свисты.

Примечателен тот факт, что все длинные свисты (с коэффициентом наклона прямой  $K_2$  ( $K_2=(7.6\pm 1.4)\cdot 10^{-3}c^{-1/2}$ )) совпадали с одиночными положительными грозовыми разрядами. Парных разрядов при извержении вулкана Шивелуч не наблюдалось.

**Исследования выполнены в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № 124012300245-2).**

### Цитируемая литература

- James M., L. Wilson S. Lane J. Gilbert T. Mather R. Harrison, Martin R. Electrical charging of volcanic plumes // Space Sci. Rev. - 2008. - Vol.137(1-4). - P.399-418. DOI:10.1007/s11214-008-9362-z
- Ewert, J. W., Holzworth, R. H. and Diefenbach, A. K. Global detection of explosive volcanic eruptions with the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) and application to aviation safety (Invited), vol. 2010, Art. no. AE31A-04, 2010
- Shevtsov B.M., et al. Lightning and electrical activity during the Shiveluch volcano eruption on 16 November 2014 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2016. - Vol.16. - P. 871-874. DOI:10.5194/nhess-16-871-2016
- Van Eaton A.R., et al. Electrical charging of volcanic plumes // Geophys. Res. Lett. - 2016. - Vol.~43. - P. 3563-3571. DOI:10.1002/2016GL068076
- Briggs M. S., et al. A terrestrial gamma ray flash from the 2022 Hunga Tonga volcanic eruption // Geophys. Res. Lett. - 2022. - Vol. 49. - Article Nee2022GL099660. DOI:10.1029/2022GL099660
- Collier A. B., et al. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand // Ann. Geophys. - 2010. - Vol.28. - P.~499-513. DOI:10.5194/angeo-28-499-2010
- Antel C., Collier A. B., Lichtenberger J., Rodger C. J. Investigating Dunedin whistlers using volcanic lightning // Geophysical Research Letters. - 2014. - Vol.41(13). - P.4420-4426. DOI:10.1002/2014GL060332
- Гирина О.А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. - 2023. - Т. 20. № 2. - С. 283-291.
- Malkin E.I., et al. Analysis of Electromagnetic Radiation During Shiveluch and Bezmyanniy Volcano Eruptions from 2017 to 2023 // Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences. - 2023. - P.62-70. DOI:10.1007/978-3-031-50248-4\_8
- Storey L.R.O. An investigation of whistling atmospherics // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. - 1953. - Vol.246, №908. - P. 113-141. DOI:10.1098/rsta.1953.0011
- Firstov P.P., et al. Registration of Atmospheric-Electric Effects from Volcanic Clouds on the Kamchatka Peninsula (Russia) // Atmosphere. - 2020. - Vol.11, №6. - Article №634. DOI:10.3390/atmos11060634
- Firstov P.P., et al. Atmospheric electrical effects during a strong explosive eruption of Bezymyanniy volcano on December 20, 2017 // Proc.IOP Conf. - 2021. - Vol.840. - №012020. - DOI:10.1088/1755-1315/840/1/012020