



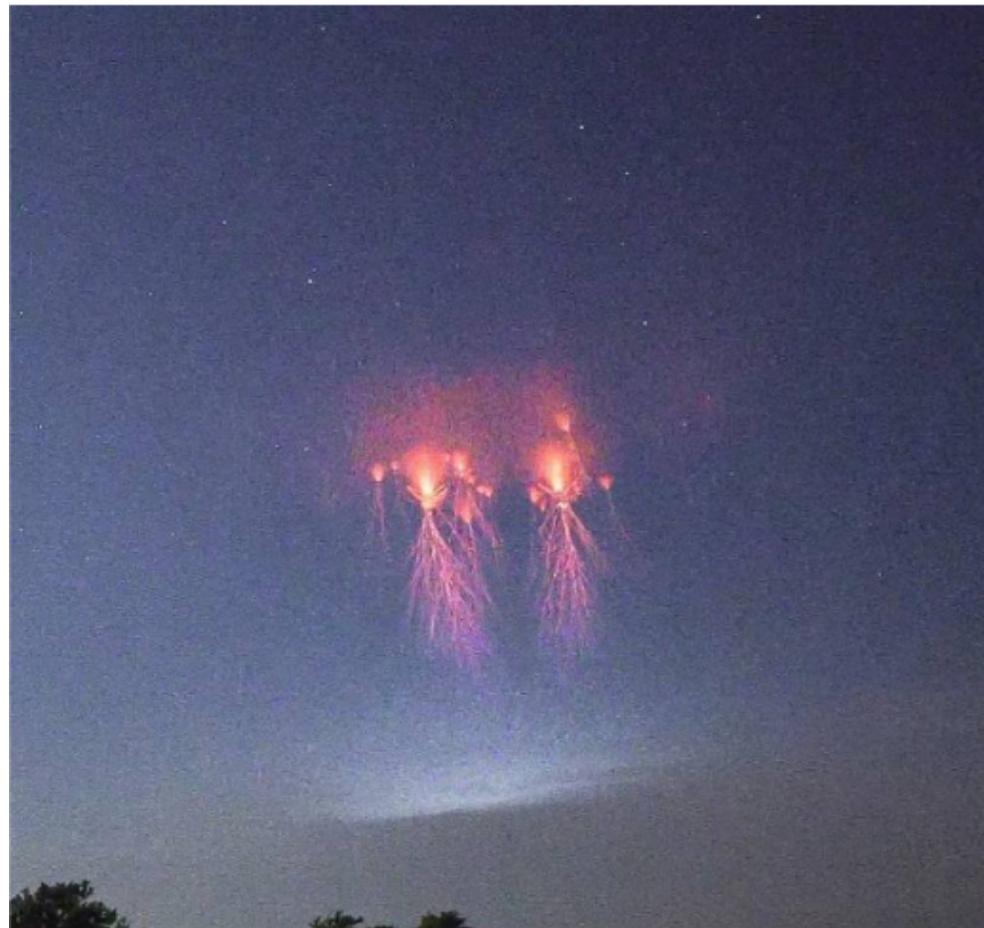
Методика определения высоты грозового разряда методом многолучевой интерферометрии

Малкин Е. И., Чернева Н. В., Казаков Е. А.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия

Одновременные наблюдения электромагнитных и оптических явлений во время грозы показывают, что высотные разряды (спрайты и яркие свечения), наблюдаемые в мезосфере над грозовыми облаками на высотах 50-90 км, производятся положительными разрядами «облако-земля», которые возбуждают атмосферики с первым полупериодом задержки во времени после всплеска ОНЧ-сигнала на величину, зависящую от дальности распространения (Winckler, 1997; Reising, 1999). Работы (Reising, 1999, Soula, 2015) показывают связь высотных разрядов с парными разрядами, указывая на то, что второй ОНЧ/КНЧ-импульс создается электрическими токами в теле самого спрайта (Reising, 1999). Измерения подтверждают, что некоторые спрайты появляются спустя 50-70 мс после соответствующего разряда «облако-земля». Для проверки данного утверждения был проведен сравнительный анализ данных WWLLN и ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН. Временной интервал составил 7 лет – с 01.01.2015 по 31.12.2021. За весь период сравнения было отобрано 27511 парных разрядов, 82 % (22519) из которых представляют собой пары положительных разрядов (+CG, +CG), парные отрицательные разряды (-CG, -CG) наблюдались в 7 %, пары отрицательный разряд – положительный разряд (-CG, +CG) в 9 %, в 2 % - промах. В работе (Malkin, 2024) была определена высота электрического разряда с помощью ОНЧ-радиопеленгатора методом двух-лучевой интерферометрии. Суть метода заключается в сравнении модельного и реального спектров мощности сигнала. В настоящей работе для увеличения точности определения высоты грозового разряда используется метод многолучевой интерферометрии. Высота, рассчитанная по свертке модельного спектра мощности с реальным спектром мощности сигнала совпадает с областью стратопаузы, где температура имеет локальный максимум, который, видимо, способствует электрическому высотному разряду.

Высотные разряды

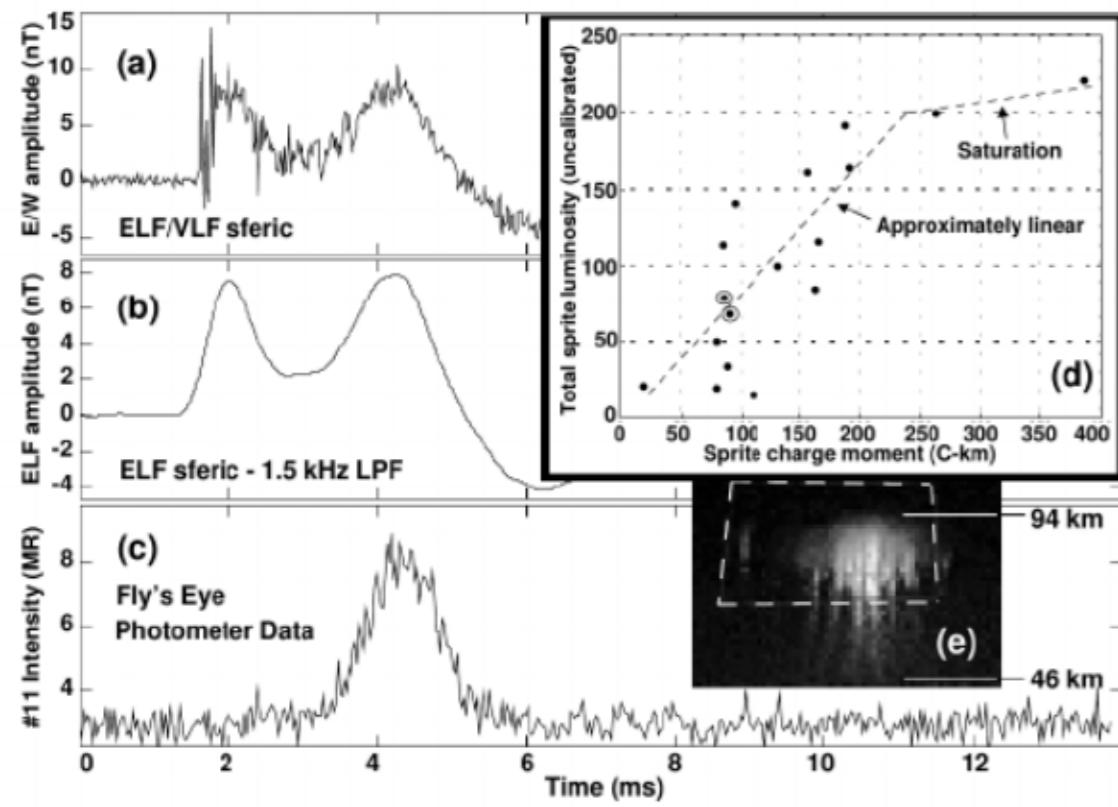


Характеристики высотных разрядов

- Площадь охватываемая разрядом $S \approx 100 \text{ км}^2$
- Время возвратного удара $t \approx 500 \mu\text{s}$
- Суммарный ток $I \approx 300 \text{ кА}$
- Суммарный заряд $Q \approx 120 \text{ Кл}$

Winckler, J.R. The cloud-ionosphere discharge: A newly observed thunderstorm phenomenon // Proc. Nat. Acad. Sci. 1997. Vol. 94(20). pp. 10512-10519. DOI: 10.1073/pnas.94.20.10512.

ОНЧ сферик - индикатор высотного разряда



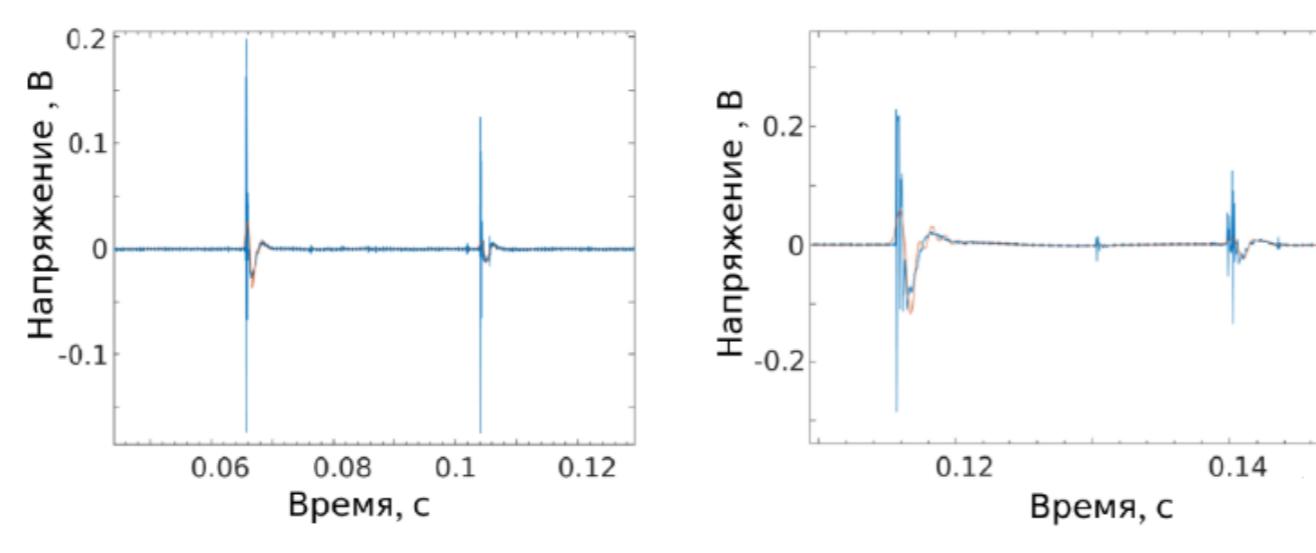
(a) Волновая форма ОНЧ/КНЧ сферика, созданного положительным разрядом, с током 67 кА, зарегистрирован на Юкка-Ридж в 08:24:00 UT, 1 августа 1996 г. (b) КНЧ сферик после фильтра нижних частот (1.5 кГц). (c) Данные об оптической интенсивности фотометра Fly's Eye с полем обзора (e). (d) Зависимость между общей яркостью спрайтов и момент разряда спрайтов для 17 спрайтов 24.08.1996.

Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F. ELF sferic energy as a proxy indicator for sprite occurrence // Geophysical Research Letters, 1999, Vol. 26(7), PP. 987-990. DOI: doi.org/10.1029/1999GL900123.

Парные разряды в данных ОНЧ-пеленгатора

Согласно работам Reising S.C. и Soula S. индикатором спрайта является положительный разряд облако-земля. Поэтому, парные положительные разряды со временной задержкой в интервале до 70 мс и расстоянием до 60 км, с высокой долей вероятности могут быть положительным разрядом облако - земля и ионосфера-облако.

Soula S. et al. Time and space correlation between sprites and their parent lightning flashes for a thunderstorm observed during the HyMeX campaign // J. Geophys. Res. Atmos., 2015. Vol. 120. 11552-11574, doi:10.1002/2015JD023894.

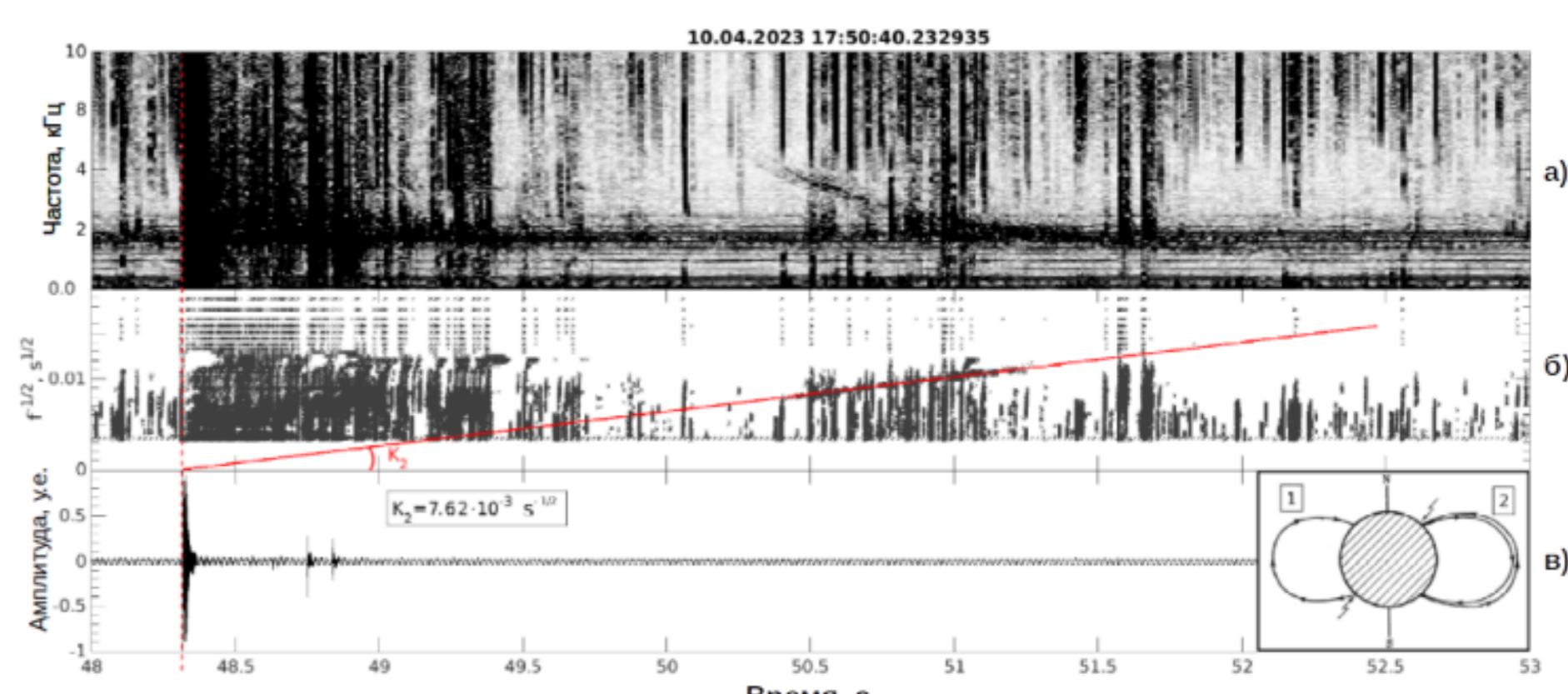


Для проверки данного утверждения был проведен сравнительный анализ данных WWLLN и ОНЧ-пеленгатора. Временной интервал составил 6 лет – с 01.01.2015 по 31.12.2021. За весь период сравнения было отобрано 27511 парных разрядов, 82 % (22519), из которых представляют собой пары положительных разрядов (+CG, +CG), парные отрицательные разряды (-CG, -CG) наблюдались в 7 %, пары отрицательный разряд – положительный разряд (-CG, +CG) в 9 %, в 2 % - промах.

Выводы

- Показано, что высотные грозовые разряды являются источниками вистлеров. Для примера использован одиночный (непарный) высотный разряд грозовой активности извержения вулкана Шивелуч.
- Высота грозового разряда, генерирующего вистлер, определялась с помощью интерференции прямого и отраженного от ионосферы радиолучей.
- Максимум распределения электрического разряда находился на верхней границе стратосферы 55 км, над областью температурной инверсии.
- Методом многолучевой интерференции можно найти высотное распределение разряда и расстояние до него. В будущем это будет одной из задач моделирования радиосигнала с решением обратной задачи нахождения пространственного распределения разряда.

Анализ связи свистящих атмосфериков и высотных разрядов с вулканическими грозами

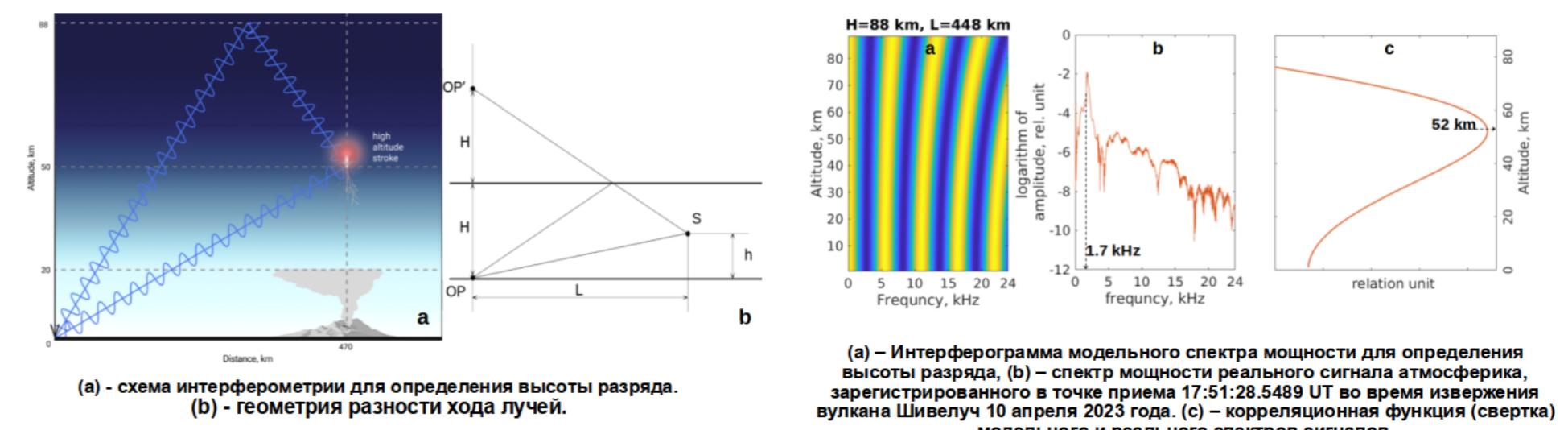


Пиковые частоты сигнала вертикальной электрической компоненты ОНЧ-пеленгатора при извержениях 07.04.2023 вулкана Безымянного (вверху) и 10.04.23 вулкана Шивелуч (внизу):

(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 рисунках

Определение высоты грозового разряда вулканической молнии

Для фиксации высотных разрядов применяются либо высокочувствительные фотометры, либо высокоскоростные камеры как описано в работе Soula S. В связи с отсутствием доступа к подобному оборудованию был предложен метод позволяющий косвенно подтвердить высоту разряда. Суть которого заключается в сравнении модельного и реального спектра мощности сигнала.

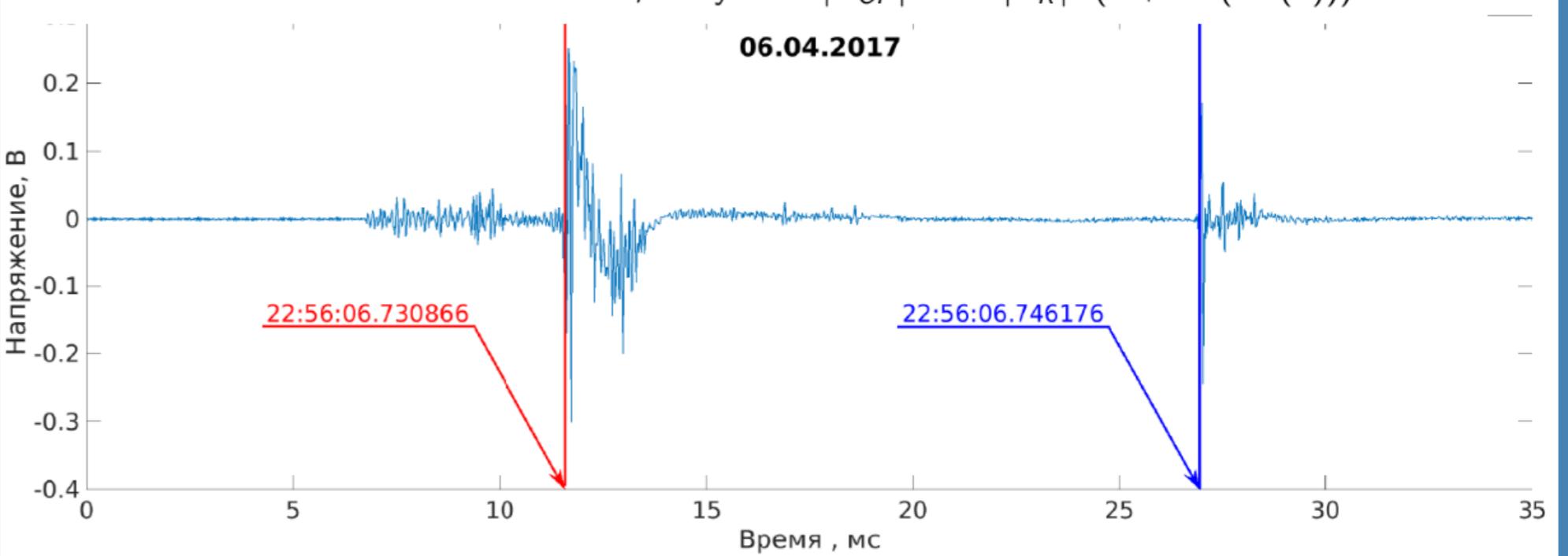


Высота грозового разряда, генерирующего вистлер, определялась с помощью интерференции прямого и отраженного от ионосферы радиолучей. Для примера использован одиночный (непарный) высотный разряд грозовой активности извержения вулкана Шивелуч.

Пример парных разрядов для которых вычисляется высота

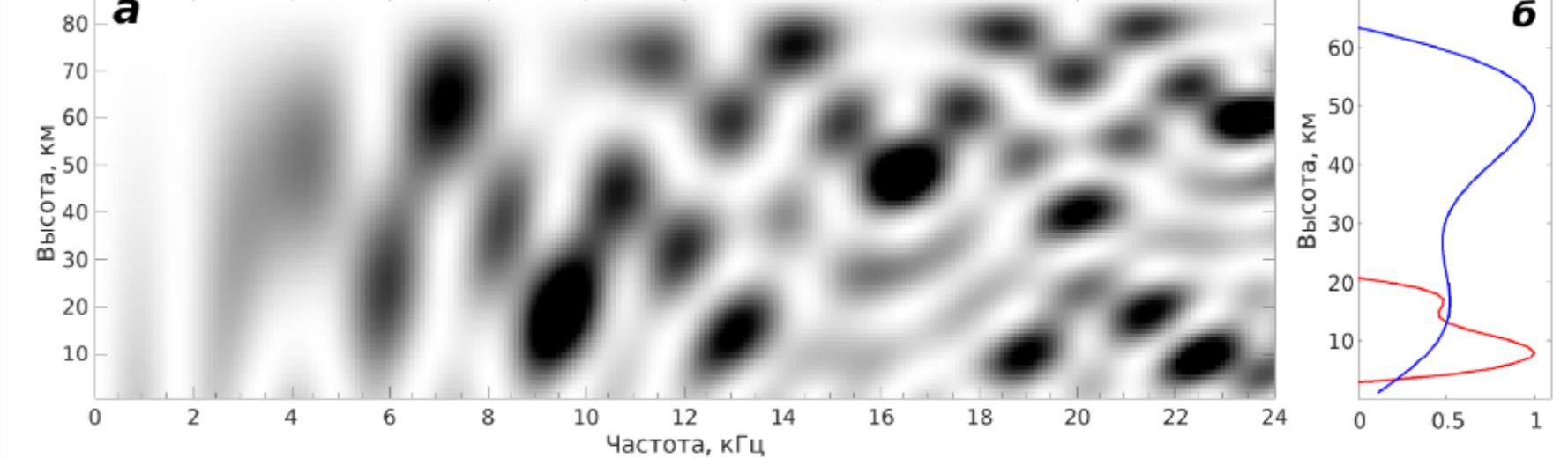
Разность хода лучей равна $\Delta L = \sqrt{L^2 + (2H - h)^2} - \sqrt{L^2 + h^2}$, а время задержки равно $\tau(h) = \Delta L(h)/c$. При условиях $0 < h < H$ и $h, H \ll L$, в первом приближении $\Delta L(h) \approx 2H(H - h)/L$.

Амплитуда сигнала в точке приема равна $A_{OP} = A_S + A_R \cdot e^{i\omega\tau}$, где A_S и $A_R \cdot e^{i\omega\tau}$ – амплитуды источника и его отражения от ионосферы, $\omega = 2\pi f$, где f – частота источника. Учитывая, что разность хода невелика, $A_S \approx A_R$, поэтому $A_{OP} = A_S + A_R \cdot e^{i\omega\tau} \approx A_S(1 + e^{i\omega\tau})$, а для интенсивности сигнала в точке приема, в зависимости от высоты источника h , получаем $|A_{OP}|^2 \approx 2|A_R|^2(1 + \cos(\omega\tau(h)))$.



Определение высоты разряда методом многолучевой интерферометрии

Первый – 22:56:06.730866 UT, $\varphi = 47.478^\circ$ N, $\lambda = 153.370^\circ$ E
Второй – 22:56:06.746176 UT, $\varphi = 47.480^\circ$ N, $\lambda = 153.365^\circ$ E



Свертка модельного спектра мощности, показанного на рисунке (а) с реальным спектром мощности сигнала в точке приема, показана на рисунке (б). Максимальное значение свертки достигается при $h_2 = 52$ для второго атмосферика и $h_1 = 8$ для первого. Результат работы алгоритма по определению высоты подтвердил, что высота источника второго атмосферика в ~70 % (15398) находится в пределах от 42 до 60 км. Если рассматривать атмосферики которые имеют интервал следования от 30 до 70 мс (5449), высота источника второго сигнала будет находиться в интервале высот от 42 до 60 км для ~99 % (5440) случаев.

Malkin E.I., Shevtsov B.M., Cherneva N.V., Kazakov E.A., Lichtenberger J. High-Altitude Discharges and Whistlers of Volcanic Thunderstorms // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 12. 1503. DOI:10.3390/atmos15121503.