

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 537.8

ОНЧ-ПЕЛЕНГАТОР ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ*

Г. И. Дружин, В. М. Пухов,
Д. В. Санников, Е. И. Малкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований и распространения радиоволн
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
684034, с.Паратунка, Елизовский район, Камчатский край ул. Мирная, 7,
E-mail: drug@ikir.ru

Для исследования мощных электромагнитных излучений от гроз в Институте космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН создан ОНЧ-пеленгатор, способный записывать сигналы электрических и магнитных компонент электромагнитного поля, определять направления прихода излучений в реальном времени. С помощью ОНЧ-пеленгатора на Камчатке исследованы эффекты, связанные с грозовыми источниками.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, ОНЧ-пеленгатор, антенны, усилительные устройства.

© Дружин Г. И. и др., 2019

Введение

В Институте космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН), расположенного на полуострове Камчатка, в пункте наблюдения «Паратунка» ($\varphi = 52^{\circ}58'N$, $\lambda = 158^{\circ}15'E$), для исследования мощных электромагнитных излучений от гроз создан ОНЧ-пеленгатор, способный записывать параметры магнитных и электрических компонент электромагнитного поля, определять направления прихода излучений в реальном времени. С помощью этого регистратора были рассмотрены характеристики грозовой активности, наблюдавшиеся на Камчатке [1-4].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-05-00543, Механизмы грозообразования в условиях активной вулканической деятельности на полуострове Камчатка

Состав ОНЧ-пеленгатора

ОНЧ-пеленгатор (рис. 1) состоит из антенной системы, блока аналоговой и блока цифровой обработки сигналов. Основные системы аппаратного комплекса разработаны, изготовлены и установлены в ИКИР ДВО РАН.

Антенная система установлена около главного здания ИКИР, в п. Паратунка, и состоит из двух взаимно-перпендикулярных рамочных магнитных антенн и одной штыревой электрической антенны.

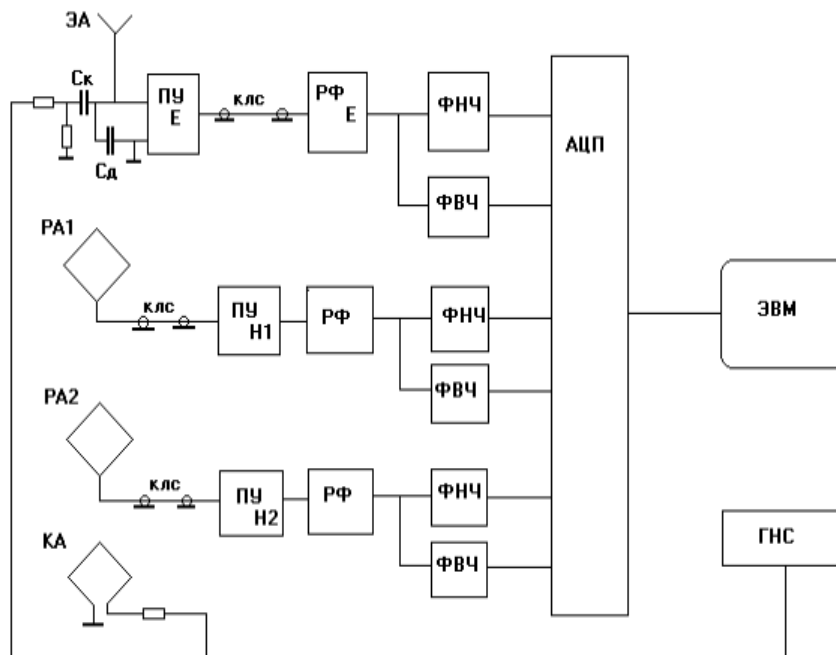


Рис. 1. Структурная схема ОНЧ-пеленгатора

Магнитные антенны расположены вертикально, плоскостью в направлении север-юг (РА1) и восток-запад (РА2), и имеют следующие параметры:

Высота антенн $h = 4$ м,

ширина антенн $l = 8$ м,

геометрическая площадь $S = 32$ м²;

количество витков $N = 100$,

эффективная площадь антенн $S_{eff} = SN = 3200$ м²,

активное сопротивление постоянному току $R = 240$ Ом,

индуктивность $L = 0.385$ Гн,

собственная емкость $C_m = 5.5$ пФ.

Электрическая антенна. Для приема электрической составляющей излучений применяется штыревая электрическая антенна (ЭА), которая включает в себя металлическое основание высотой $h_o = 1$ м, в верхней части которого находится изолятор, на который крепится штырь длиной $l_e = 8$ м. Общая высота штыревой антенны от верхней части штыря до его основания $l = 9$ м. Следовательно, действующая высота электрической антенны $h_E = l \cdot 0.5 = 4.5$ м. С целью расширения динамическо-

го диапазона и расширения частотного диапазона параллельно выходным клеммам антенны включен дополнительный конденсатор $C_{add} = 620$ пФ.

Согласование электрической и магнитных антенн. С целью расширения частотного диапазона магнитных антенн и получения значений в рабочем диапазоне действующих высот антенн, слабо зависящих от частоты, выходы магнитных антенн шунтированы сопротивлением $R_H = 100$ Ом (рис. 2).

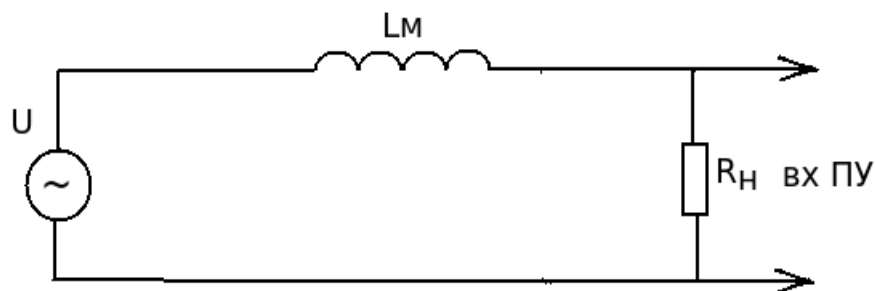


Рис. 2. Шунтирование входа предварительного усилителя сопротивлением R_H , подключенного к выходу магнитной антенны, имеющей индуктивность L_M

Шунтирование входа предварительных усилителей (ПУ), подключенных к выходам магнитных антенн, связано с тем, что действующая длина электрической антенны не зависит от частоты и не имеет фазового сдвига между значениями напряженности электрического поля и наведенной э.д.с., в то время как действующая длина магнитной антенны линейно зависит от частоты и имеется фазовый сдвиг $\frac{\pi}{2}$ между напряженностью магнитного поля и наведенной э.д.с. Для устранения указанных зависимостей использована простая схема коррекции, основанная на шунтировании входа ПУ магнитных антенн сопротивлением.

Э.д.с. электрической антенны U_E связана с действующей высотой h_E и напряженностью электрического поля следующим образом:

$$U_E = h_E E, \quad (1)$$

Э.д.с. магнитной антенны:

$$U_M = j h_M E, \quad (2)$$

действующая высота магнитной антенны:

$$h_M = \frac{\omega N S}{c}, \quad (3)$$

где ω — циклическая частота, N — количество витков, S — площадь антенны, c — скорость света.

Чтобы исключить частотную и фазовую зависимости, последовательно с индуктивностью L_M магнитной антенны включено сопротивление нагрузки, подключенное ко входу ПУ, много меньшее индуктивного сопротивления антенны, $R_H \ll |j\omega L|$. В результате для дальней зоны приема излучения на входе предварительного усилителя

магнитной составляющей сигнала в рабочем диапазоне частот получаем напряжение, не зависящее от частоты и без фазового сдвига. При этом коэффициент передачи антенной цепи по напряжению (от источника э.д.с. до входа предварительного усилителя):

$$K = \frac{R_H}{j\omega L_M}, \quad (4)$$

а напряжение на входе предусилителя:

$$U_V = \frac{ENSR_H}{cL_M}, \quad (5)$$

Усилительные устройства. Предварительные усилители по магнитной составляющей излучений собраны на микросхемах типа *544УД1Б*. Первый каскад выполнен по дифференциальной схеме и служит для согласования антенны со входом усилителя. Частотный диапазон ПУ – 1 Гц ÷ 100 кГц. В области, ограниченной фильтром нижних частот (ФНЧ), коэффициент усиления $K_{PL} = 20$, а фильтром верхних частот (ФВЧ) – $K_{PH} = 220$. ФНЧ и ФВЧ включены с целью ограничения влияния на усилительные устройства вне полосных помех, а для ограничения помех сети 50 Гц в схему усилительного тракта введен режекторный фильтр (РФ), ослабляющий сигналы частоты 50 Гц на 50 Дб, собранный на микросхемах типа *157УД2*. ПУ электрической антенны расположен непосредственно у её основания и имеет коэффициент передачи по напряжению $K_E = 1$, выполнен на микросхеме *544УД1Б*, защищен по входу от перенапряжений, имеет большое входное сопротивление, обеспечивающее согласование его с антенной в широком диапазоне частот. Запись полученного сигнала осуществляется на ЭВМ (персональный компьютер) через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в качестве которого используется звуковая плата M-Audio® Delta 1010. Оцифровка производится с разрядностью 16 бит и частотой дискретизации 48 кГц.

Регистрация сигнала может осуществляться либо в диапазоне нижних частот, либо в диапазоне верхних частот. При регистрации сигнала в диапазоне верхних частот включается ФВЧ, который ограничивает влияние излучений, частотный диапазон которых ниже 3 кГц. В качестве ФВЧ используется активный фильтр с усилением по напряжению в рабочей полосе частот $K_{FHF} = 11$. Прием атмосфериков осуществляется при превышении порогового уровня 1 В/м. Персональный компьютер обрабатывает получаемую информацию в реальном времени. Максимальная длительность выделенных излучений выше этого порога составляет 400 точек. ФНЧ включается при регистрации сигналов ниже 3 кГц с усилением $K_{FLF} = 47$.

В результате обработки сигнала создаются 2 суточных файла, в один из которых записываются реализации сигнала (Е и Н компоненты электромагнитного поля выделенных излучений), в другой – только определенные параметры реализации (дата, время, средние значения Е и Н компонент поля, длина реализации, азимутальные углы). В дальнейшем файлы обрабатываются с помощью стандартных программ (EXEL, MATLAB и др.) и специально разработанного программного обеспечения.

Калибровка. Для калибровки по магнитной составляющей излучений в центре магнитных антенн под углом 45^0 к плоскостям рамок расположена калибровочная антенна (КА), имеющая следующие параметры:

высота $h_{mk} = 1.4$ м,

ширина $l_{mk} = 1.4$ м,

геометрическая площадь $S_{mk} = 1.96$ м²,

количество витков $N_{mk} = 60$,
 эффективная площадь $S_{efmk} = S_{mk} * N_{mk} = 117.6 \text{ м}^2$,
 активное сопротивление по постоянному току $R_{mk} = 31.9 \text{ Ом}$,
 индуктивность $L_{mk} = 22.1 \text{ мГн}$,
 собственная емкость $C_{mk} = 2.85 \text{ нФ}$.

Калибровочная антенна (рис. 1, КА) подключается к генератору стандартных сигналов через сопротивление $R_{dk} = 7.5 \text{ кОм}$. При таком подключении обеспечивается постоянство магнитного потока калибровочной рамки в широком частотном диапазоне.

Для проведения калибровки ОНЧ-пеленгатора по электрической составляющей сигнала от внешнего источника (от генератора синусоидальных сигналов или от генератора шума) через делитель 1:10, выполненный на резисторах, и емкость $C_k = 86 \text{ пФ}$ подается напряжение на вход первого каскада (рис. 1, ПУ Е).

Определение направления прихода электромагнитной волны

Известно, что диаграмма направленности магнитной антенны, короткой по сравнению с длиной волны (размеры антенны много меньше длины волны), представляет собой «восьмерку» (два круга, соединенные между собой), а диаграмма направленности электрической штыревой антенны – круг (напряжение на выходе электрической антенны не зависит от направления прихода волны). При определении направления по измерениям напряжений на выходе магнитных антенн возникает неопределенность в определении азимута прихода волны, которая устраняется с помощью измерений амплитуд и фаз напряжений на выходе электрической антенны (рис. 3).

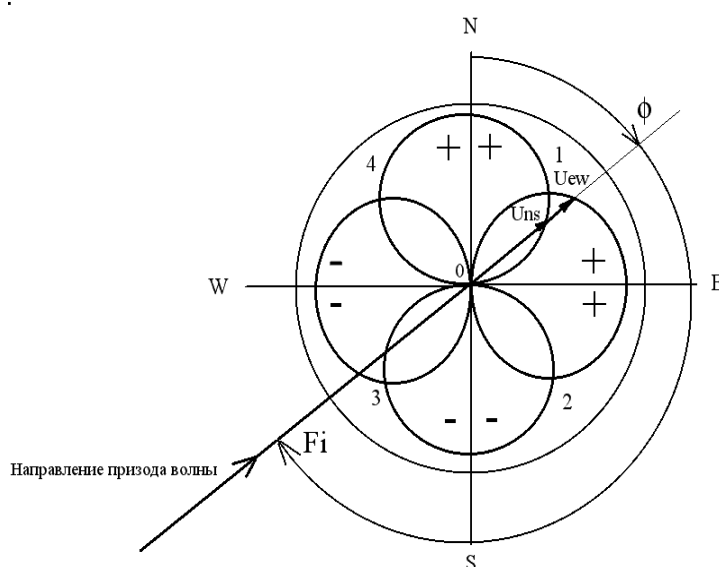


Рис. 3. Определение направления прихода волны по измерениям напряжений на выходах магнитных и электрической антенн, используя свойства их диаграмм направленности. Стороны света обозначены: N – север, E – восток, S – юг, W – запад.

По измерениям излучений, наведенных на магнитных антеннах, направление прихода волны (без учета квадранта) определяется следующим выражением:

$$\phi = \arctg(U_{ew}/U_{ns}),$$

где U_{ns} – напряжение на выходе антенны, плоскость которой ориентирована в направлении север - юг; U_{ew} – напряжение на выходе антенны, плоскость которой ориентирована в направлении восток – запад.

Поскольку угол ϕ может находиться в любой четверти (квадранте), то возникает неоднозначность в определении направления прихода волны. Неоднозначность в определении пеленга устраняется с помощью измерения напряжения на выходе электрической антенны U_e . В случае, если $U_{ns} U_e > 0$ и $U_{ew} U_e > 0$, то азимутальный угол прихода волны $Fi = \phi$ находится в 1-ом квадранте (излучение приходит с азимутального направления, лежащего в диапазоне азимутальных углов от 0 до 90 град). Возможные варианты определения прихода волны представлены ниже:

$U_{ns} U_e > 0, U_{ew} U_e > 0$	$Fi = \phi$	1 квадрант ($0^0 - 90^0$)
$U_{ns} U_e < 0, U_{ew} U_e > 0$	$Fi = 180^0 - \phi$	2 квадрант ($90^0 - 180^0$)
$U_{ns} U_e < 0, U_{ew} U_e < 0$	$Fi = 180^0 + \phi$	3 квадрант ($180^0 - 270^0$)
$U_{ns} U_e > 0, U_{ew} U_e < 0$	$Fi = 360^0 - \phi$	4 квадрант ($270^0 - 360^0$)

На рис. 4 в качестве примера показаны вариации сигнала, принятого от грозового источника, по действующим значениям которого определяется направления прихода волны.

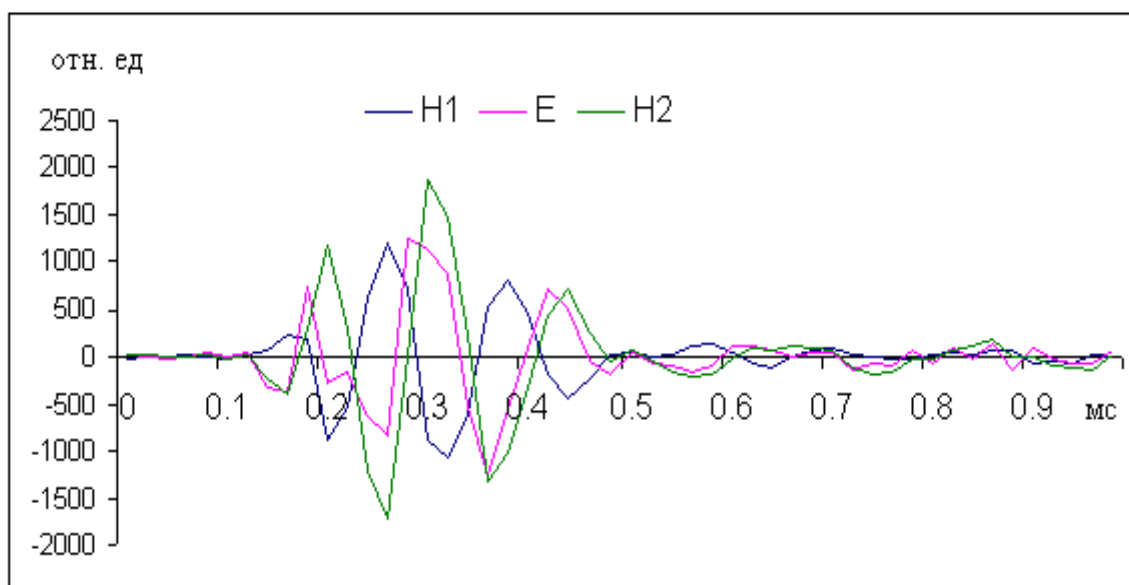


Рис. 4. Пример регистрации сигнала, пришедшего от грозового источника по волноводу Земля – ионосфера. H1 (север – юг) и H2 (восток – запад) – магнитные компоненты вектора H, E – вертикальная электрическая компонента вектора E. Время дискретизации – 20 мкс, время реализации 1 мс

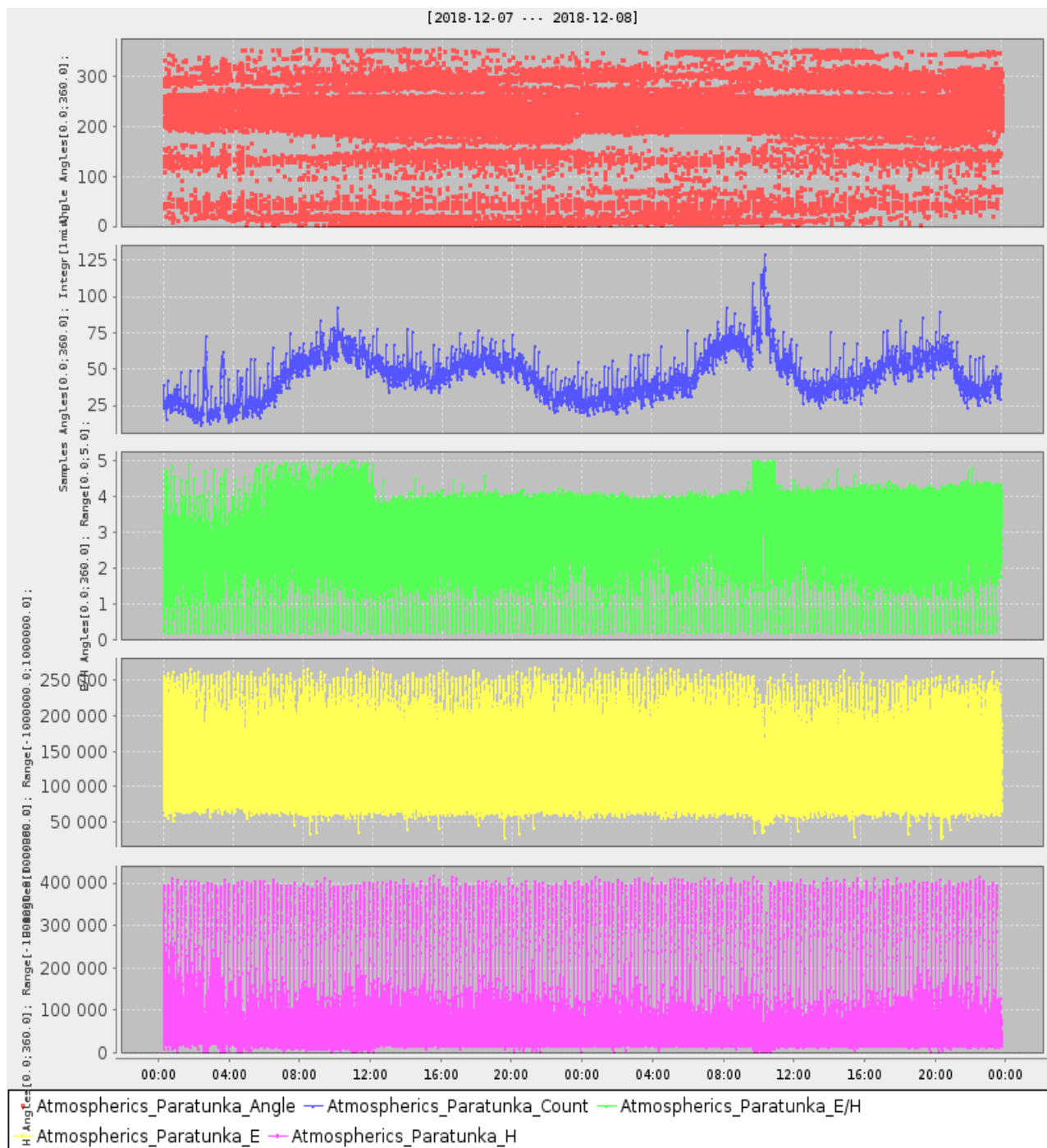


Рис. 5. Пример записи излучений, пришедших от грозовых источников 7 и 8 декабря 2018 г.: а) – азимутальное распределение, в котором каждая точка соответствует одному грозовому разряду, форма сигнала которого имеет вид, аналогичный приведенному на рис. 4; б) – поминутное распределение числа грозовых разрядов с азимутов $0^{\circ} - 360^{\circ}$; в) – отношение эффективных значений напряжений, полученных с электрической и магнитных антенн — E/H ; д) – амплитуда электрической составляющей сигнала E ; е) – амплитуда магнитной составляющей сигнала H

На рис. 5 (сверху вниз) показан пример записи: азимутального распределения излучений от гроз; поминутного количества пришедших излучений; отношения на-

пряжений E/H, полученных с электрической и магнитных антенн; амплитуд электрической компоненты излучений; амплитуд магнитной компоненты излучений. Из записи, приведенной на рис. 5, видно, что 7 и 8 декабря 2018 г. наибольшее количество излучений от грозовых разрядов приходило с юго-западного направления, максимальное количество излучений наблюдалось в 10 UT и в 20 UT, отношение E/H наиболее значительно изменялось 7 декабря, зависимость амплитуд E и H от времени практически не проявлялась.

Заключение

Для исследования электромагнитных излучений от гроз в ИКИР ДВО РАН создан ОНЧ-пеленгатор, способный записывать параметры магнитных и электрических компонент электромагнитного поля, определять направления прихода излучений в реальном времени. Применение регистратора позволило рассмотреть грозовые источники излучений, наблюдавшиеся на Камчатке.

Список литературы/References

- [1] Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников А.Н., “Грозовая активность по наблюдениям за ОНЧ излучением на Камчатке”, *Геомagnetизм и аэрономия*, **49:8** (2009), 1305–1307. [Druzhin G.I., Cherneva N.V., Mel'nikov A.N., “Grozovaya aktivnost' po nablyudeniyaam za ONCH izlucheniye na Kamchatke”, *Geomagnetizm i aeronomiya*, **49:8** (2009), 1305–1307].
- [2] Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников В.Н., “Гроза в районе полуострова Камчатка по данным наблюдений за ОНЧ-излучением.”, *Метеорология и гидрология*, **7** (2011), 32–38. [Druzhin G.I., Cherneva N.V., Mel'nikov V.N., “Groza v rayone poluostrova Kamchatka po dannym nablyudeniya za ONCH-izlucheniye”, *Meteorologiya i gidrologiya*, **7** (2011), 32–38].
- [3] Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И., “О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки”, *Доклады АН*, **412:4** (2007), 547–551. [Kuznetsov V.V., Cherneva N.V., Druzhin G.I., “O vliyaniy tsiklonov na atmosfernoye elektricheskoye pole Kamchatki”, *Doklady AN*, **412:4** (2007), 547–551].
- [4] Михайлов Ю.М., Дружин Г.И., Михайлова Г.А., Капустина О.В., “Динамика грозовой активности во время тропических циклонов”, *Геомagnetизм и аэрономия*, **46:6** (2006), 825–839. [Mikhaylov YU.M., Druzhin G.I., Mikhaylova G.A., Kapustina O.V., “Dinamika grozovoy aktivnosti vo vremya tropicheskikh tsiklonov”, *Geomagnetizm i aeronomiya*, **46:6** (2006), 825–839].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников А.Н. Грозовая активность по наблюдениям за ОНЧ излучением на Камчатке // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2009. Т. 49. №8. С. 1305–1307.
- [2] Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников В.Н. Гроза в районе полуострова Камчатка по данным наблюдений за ОНЧ-излучением // *Метеорология и гидрология*. 2011. Т. 7. С. 32–38.
- [3] Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки // *Доклады АН*. 2007. Т. 412. №4. С. 547–551.
- [4] Михайлов Ю.М., Дружин Г.И., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Динамика грозовой активности во время тропических циклонов // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2006. Т. 46. №6. С. 825–839.

Для цитирования: Дружин Г.И., Пухов В.М., Санников Д.В., Малкин Е.И. ОНЧ-пеленгатор грозовых разрядов // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2019. Т. 27. № 2. С. 95-104. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104

For citation: Druzhin G.I., Pukhov V.M., Sannikov D.V., Malkin E.I. VLF lightning direction finder, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2019, **27**: 2, 95-104. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

MSC 83C50

VLF LIGHTNING DIRECTION FINDER¹

G. I. Druzhin, V. M Pukhov, D. V. Sannikov, E. I. Malkin

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 684034 Russia, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7.

E-mail: drug@ikir.ru

For the study of powerful electromagnetic radiation from thunderstorms, a VLF direction finder was created at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, capable of recording signals of electrical and magnetic components of the electromagnetic field, and determining the direction of radiation arrival in real time. With the help of VLF direction finder in Kamchatka, the effects associated with thunderstorm sources are investigated.

Keywords: electromagnetic radiation, VLF direction finder, antennas, amplifying devices.

© Druzhin G. I. et. all, 2019

Поступила в редакцию / Original article submitted: 10.04.2019

¹This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-05-00543, Mechanisms of thunderstorm formation in conditions of active volcanic activity on the Kamchatka Peninsula