


ПРИВОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 621.396



## Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений ОНЧ–излучений на Камчатке

*Е. И. Малкин\*, Г. И. Дружин*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
684034, с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, Россия

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена описанию аппаратно-программного комплекса, разработанного в Институте космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН и установленного в районе р. Карымшина (Елизовский район, Камчатский край, Россия). Аппаратно-программный комплекс предназначен для приема естественного электромагнитного излучения в ОНЧ диапазоне с целью исследования источников электромагнитных излучений и выявления особенностей распространения сигналов вдоль земной поверхности и при прохождении их через ионосферу и магнитосферу Земли. Особое внимание при этом было уделено точности определения азимутальных углов прихода излучений от высотных грозных разрядов, ответственных за возникновение свистящих атмосфериков, наблюдаемых в ОНЧ-диапазоне. Подробно дано описание: приемного антенного комплекса; методики определения азимутов прихода излучений; калибровки ОНЧ-пеленгатора; проверки работоспособности комплекса при приеме сигналов радиостанций точного времени и от грозных разрядов, зарегистрированных всемирной сетью WWLLN. Приемный антенный комплекс состоит из: двух магнитных антенн, расположенных вертикально, плоскостью в направлении север-юг и восток-запад, и электрической антенны. Каждая магнитная антенна содержит 98 витков медного провода и имеет геометрическую площадь 48 м<sup>2</sup>. Электрическая штыревая антенна имеет высоту 9 м от верхней части до её основания. При приеме сигналов применялись 2 метода определения азимута источников ОНЧ-излучений – амплитудный и спектральный. Для оперативной работы использовался наиболее простой, амплитудный метод. Для более точного определения азимута разработан спектральный метод, вычисление с помощью которого занимает большее время, но который позволяет более чем на порядок увеличить точность в определении азимута, по сравнению с амплитудным методом. Применение спектрального метода позволило провести исследования связи высотных грозных разрядов с активностью гроз метеорологического и вулканического происхождения и показать, что высотные грозные разряды являются источниками вистлеров. Для регистрации и хранения данных был разработан программный комплекс, включающий в себя клиентскую и серверную части. Сервер выполняет обработку потока данных, полученных с АЦП, и привязку к точному времени. Клиентская часть отвечает за формирование полноценного архива и его хранение. Калибровки магнитных антенн осуществлялась путем подачи шумовых и синусоидальных сигналов на магнитные и электрическую антенны.

*Ключевые слова:* регистрация атмосфериков, направление, электромагнитные импульсы, ОНЧ-пеленгатор молний

Получение: 03.06.2025; Исправление: 27.06.2025; Принятие: 18.09.2025; Публикация онлайн: 19.09.2025

*Для цитирования.* Малкин Е. И., Дружин Г. И. Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений ОНЧ–излучений на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2025. Т. 51. № 2. С. 122-141. EDN: Y1HWL1. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2)

**Конкурирующие интересы.** Конфликт интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

\***Корреспонденция:** ✉ Е-mail: [malkin@ikir.ru](mailto:malkin@ikir.ru)

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Малкин Е. И., Дружин Г. И., 2025

© ИКИР ДВО РАН, 2025 (оригинал-макет, дизайн, составление)





## Hardware and Software Complex and Methods of Observing VLF Radiation in Kamchatka

*E. I. Malkin\**, *G. I. Druzhin*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,  
684034, Paratunka, Elizovo raion, Kamchakskiy kray, Russia

**Abstract.** The paper is devoted to the description of the hardware-software complex developed at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS and installed in the region of Karymshina river (Elizovo raion, Kamchatksiy kray, Russia). The hardware-software complex is aimed at receiving the natural electromagnetic radiation in VLF range to investigate electromagnetic radiation sources and detect the features of signal propagation along the Earth surface and during its passage through the Earth ionosphere and magnetosphere. Special attention was focused on the detection accuracy of azimuthal arrival angles of the radiation from height lightning discharges responsible for whistler occurrences observed in the VLF range. Detailed description is given for the receiving antenna complex, the method for detection of radiation arrival azimuth, VLF direction finder calibration, checking the complex operation when receiving signals from correct time radio stations and from lightning discharges recorded by the WWLLN global network. The receiving antenna complex consists of two magnetic antennas, arranged vertically with the plane in the north-southern and east-western directions, and an electric antenna. Each magnetic antenna contains 98 coils of copper wire and has the geometric square of 48 m<sup>2</sup>. The electric rod antenna has the height of 9 m from its upper part to its basis. When receiving signals, two methods for determination of VLF radiation source azimuths were applied, the amplitude and spectral ones. For the effective operation, the simplest one, the amplitude method, was applied. For the most accurate determination of the azimuth, the spectral method was developed. It takes more time to make calculations by it but it allows one to improve the accuracy of azimuth determination by more than one order compared to the amplitude method. Application of the spectral method made it possible to investigate the relation of height lightning strokes with the activity of thunderstorms of meteorological and volcanic origin and showed that height lightning discharges are the sources of whistlers. A software complex was developed to record and store the data. It includes client and server ends. The server processes the data flow from the ADC and makes correct time referencing. The client end is responsible for full archive organization and its storage. Magnetic antennas are calibrated by sending noise and sinusoidal signals on magnetic and electric antennas.

*Key words:* atmospheric registration, direction, electromagnetic pulses, VLF direction finder lightning.

Received: 03.06.2025; Revised: 17.09.2025; Accepted: 18.09.2025; First online: 19.09.2025

**For citation.** Malkin E. I., Druzhin G. I. Hardware-software complex and method of VLF radiation observations in Kamchatka. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2025, 51: 2, 122-141. EDN: YIHWLI. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-122-141>.

**Funding.** The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2)

**Competing interests.** There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

\*Correspondence:  E-mail: [malkin@ikir.ru](mailto:malkin@ikir.ru)

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Malkin E. I., Druzhin G. I., 2025

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2025 (original layout, design, compilation)



## Введение

Естественное электромагнитное излучение, регистрируемое на земной поверхности, формируется в основном, источниками атмосферного [1–4] и магнитосферного [1, 3, 5–7] происхождений. В некоторых случаях наблюдаются излучения, совпадающее с процессами, происходящими в земной коре и при извержении вулканов [8–14]. В большинстве случаев для исследования этих процессов применяются методы пассивной локации. К настоящему времени разработаны десятки методов и систем пассивной локации гроз, широко используемых для решения практических задач. Среди этих систем особое место занимают однопунктовые грозопеленгаторы. Они состоят из пеленгатора, в котором для определения направления на источник излучения традиционно используются скрещенные магнитные рамки Е-Н-дальномера, в котором используется различная зависимость от расстояния отношения вертикальной электрической к горизонтальным магнитным составляющим электромагнитного поля при излучении молниевых разряда [15]. В работе [16] приводится анализ погрешностей трёх методов местоопределения грозового разряда: однопунктового, триангуляционного и гибридного двухпунктового. Описывается алгоритм определения координат грозового разряда в зависимости от углов прихода атмосфериков в пункты регистрации, учитывающий точности различных методов с наименьшими ошибками определения местоположения грозового разряда.

Методика и система измерений пространственных углов прихода электромагнитных волн ОНЧ-диапазона описаны в работах [17–19]. Развитие методов комплексного мониторинга окружающей среды с целью регистрации атмосфериков предполагает наращивание геофизических исследований, создание стационарных и мобильных пунктов наблюдений [20].

Международный опыт работ в данной области подтверждает, что получение достоверной информации о развитии и обнаружении грозовых облаков, его типах и масштабах возможно только в случае привлечения всех современных методов исследований [21–25].

Целью настоящей работы является описание разработанного в ИКИР ДВО РАН аппаратно-программного комплекса, предназначенного для пеленгации источников естественного электромагнитного излучения в КНЧ-ОНЧ диапазоне.

## 1 Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений

### 1.1 Антенный комплекс

Для наблюдений за естественным электромагнитным излучением в диапазоне очень низких частот в Комплексном геофизическом стационаре «р. Карымшина» ( $\varphi = 52^{\circ}49' \text{ N}$ ,  $\lambda = 158^{\circ}07' \text{ E}$ ) ИКИР ДВО РАН, расположенном на полуострове Камчатка, в 1993 г. был установлен ОНЧ-регистратор с аналоговой обработкой сигнала [26]. В 2005 г. была проведена его модернизация, была подключена антенная система, состоящая из трёх взаимно-перпендикулярных

рамочных антенн и одной штыревой электрической антенны (рис. 1), что позволило определять направление прихода электромагнитного излучения. Две рамочные антенны, предназначенные для приёма магнитной составляющей электромагнитного поля, расположены вертикально и ориентированы плоскостью в направлении север-юг и восток-запад, третья горизонтально. Высота рамочных антенн  $h = 4$  м, ширина  $l = 8$  м, количество витков  $N = 98$ . Штыревая антенна длиной 2 м была закреплена на верхнем основании рамочных антенн. В центре антенной системы была установлена малая рамочная антенна, предназначенная для калибровки ОНЧ-пеленгатора по магнитной составляющей излучений. Вблизи нижнего основания антенн находились предварительные усилители, сигналы с которых поступали по кабельной линии связи длиной 200 м на блок повторителей напряжения и записывались на персональный компьютер через 16-bit звуковую плату Fast Track Ultra 8R с частотой дискретизации 44100 Гц. Затем сигналы по системе телеметрии поступали в центр обработки данных, где проводилась предварительная обработка и хранение информации. В силу ограниченности технологий, хранение данных до 2011 года было фрагментарным. После создания сетевого хранилища сохраняется непрерывный поток данных по настоящее время, позволяя проводить ретроспективный анализ. После обильных снегопадов в 2014 г. каркас рамочной антенны был повреждён и было принято решение о полной перестройке антенного комплекса. В 2016 г. в эксплуатацию была введена новая антенная система с установкой электрического несимметричного диполя отдельно от каркаса магнитных антенн. Система регистрации была сохранена без изменений. В 2020 г. была произведена модернизация системы регистрации, АЦП было заменено на промышленную L-CARD E-502, что позволило отказаться от кабельной линии связи и тем самым уменьшить уровень помех, отношение сигнал шум было увеличено в 2 раза. Также была увеличена частота дискретизации до 62.5 кГц.

*Магнитные антенны* расположены вертикально, плоскостью в направлении север-юг (РА1) и восток-запад (РА2), и имеют следующие параметры: высота антенн  $h = 6$  м, ширина антенн  $l = 8$  м, геометрическая площадь  $S = 48$  м<sup>2</sup>; количество витков  $N = 98$ , эффективная площадь антенн  $S_{eff} = SN = 4704$  м<sup>2</sup>, активное сопротивление постоянному току  $R = 240$  Ом, индуктивность  $L \simeq 0.276$  Гн, собственная емкость  $C_m \simeq 5.5$  пФ.

*Электрическая антенна.* Для приёма электрической составляющей излучений применяется штыревая электрическая антенна (ЭА), которая включает в себя металлическое основание высотой  $h_0 = 2.3$  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.

*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 зашунтированы сопротивлением  $R_H = 1$  кОм.

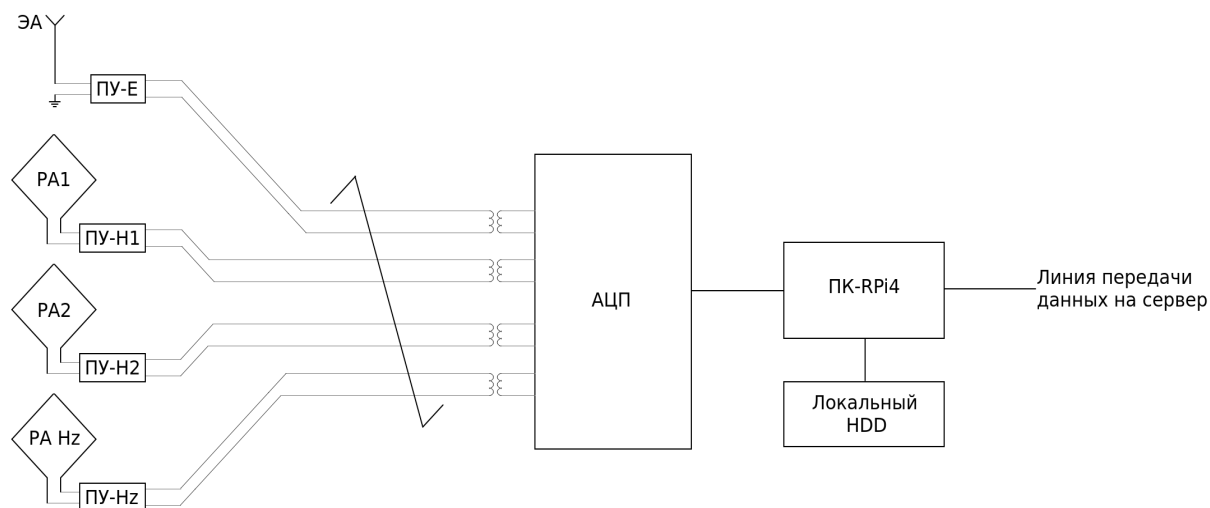


Рис. 1. Структурная схема ОНЧ-пеленгатора  
Figure 1. Block diagram of the VLF direction finder

## 1.2 Усилители аналогового сигнала

Предварительные усилители (ПУ) по магнитной составляющей излучений собраны на прецизионных операционных усилителях  $AD744(AD797)$ . Первый каскад выполнен по несимметричной схеме. Во втором каскаде на микросхемах  $OP37(OP27)$  реализован фильтр Батерворта с частотой среза 10 кГц – подавлением 5 дБ на октаву. Таким образом рабочий диапазон предварительного усилителя составляет 300 Гц ÷ 18 кГц. Выходной каскад усилителя реализован на микросхеме  $SSM2142$ , которая формирует дифференциальный выход, что позволяет передать усиленный сигнал по витой паре на расстояние до 2 км. Благодаря используемым операционным усилителям коэффициенты передачи ПУ магнитных антенн совпадают до  $10^{-4}$ .

Схемотехника предварительного усилителя электрической составляющей отличается наличием грозозащиты, реализованной парой диодов и неоновой лампой. Принципиальные схемы представлены на рис. 2.

## 1.3 Аналого-цифровая обработка сигнала и хранение данных

Для регистрации и хранения данных был разработан программный комплекс, включающий в себя клиентскую и серверную части. Сервер выполняет обработку потока данных, полученных с АЦП, по протоколу TCP и привязку к точному времени, которое определяется по сигналу модуля, подключенного к порту RS235 компьютера. Для обработки данных GPS/GLONAS-модуля на компьютере установлен NTP-сервер, позволяющий определять время с точностью до 1 мкс, что подтверждается данными Всемирной сети определения местоположения молний – World Wide Lightning Location Network (WWLLN).

Клиентская часть отвечает за формирование полноценного архива и его хранение.

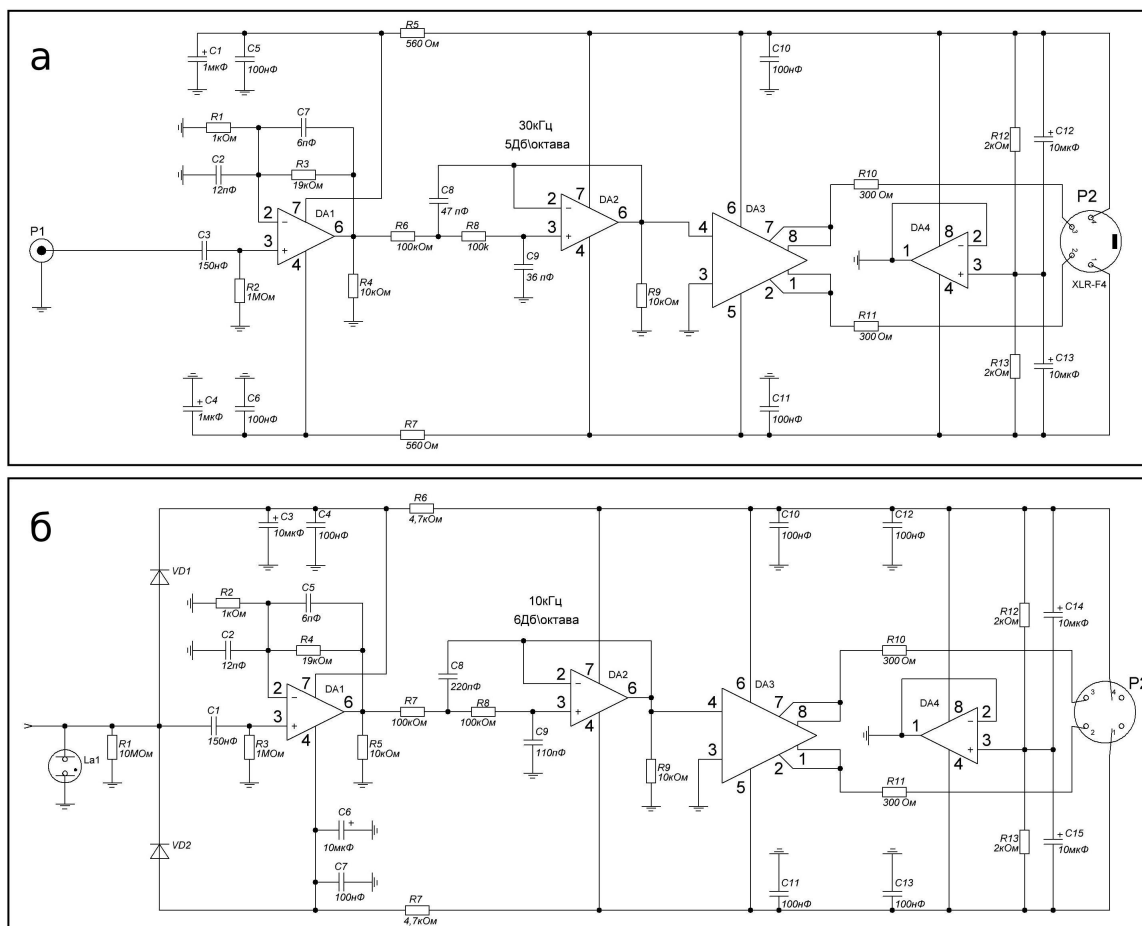


Рис. 2. Принципиальная схема предварительного усилителя рамочной антенны (а), и электрической антенны (б)  
 Figure 2. Schematic diagram of the preamplifier of the loop antenna (a) and the electric antenna (b)

Архив аппаратно выполнен на базе двух серверов Supermicro с четырьмя архивами, выполненными по схеме Raid10, общий объём которых составляет 100 ТБ. Клиентская часть представляет собой набор bash-скриптов для операционной системы Devuan (семейства Linux), осуществляющих контроль работоспособности комплекса, синхронизацию времени, сохранения кэша данных станции и их архивацию. На случай обрыва связи, в серверной части предусмотрено сохранение оцифрованных данных на локальный носитель. Данные, полученные клиентом, преобразовываются в wav-формат и сжимаются архиватором rbzip2. Данная процедура позволяет добиться до 60 % экономии места на носителях, при этом сформировать возвратный архив (архив без потерь).

### 1.4 Программный комплекс пеленгатора и методика анализа данных

Багодаря конструкции ОНЧ-пеленгатор способен регистрировать отдельные компоненты поля с привязкой к географическим направлениям. При этом, азимут

источника плоскополяризованной электромагнитной волны будет определяться по формуле  $\varphi = \arctan(U_{ew}/U_{ns})$ , где  $U_{ew}$  – значение напряжения, полученное с выхода усилителя рамочной антенны с направления восток-запад,  $U_{ns}$  – с направления север-юг. Устранение неоднозначности пеленга происходит путём учёта разности фаз между сигналами электрической и магнитными компонентами поля. Для определения азимута в среде MATLAB было реализовано два алгоритма. Первый позволяет в режиме реального времени определять азимут прихода электромагнитной волны с погрешностью до  $5^\circ$ . Второй требует значительных вычислительных ресурсов и не способен обрабатывать поток данных в реальном времени, но погрешность определения азимута снижается до  $0.5^\circ$ . Основной вклад в это значение вносит несимметричность антенн. Неортогональность антенн также вносит вклад в погрешность определения азимута, максимальное значение которого достигается при значениях азимутов  $\Delta\alpha \pm k\frac{\pi}{2}$ ,  $\Delta\alpha$  может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta\alpha = (\widehat{n_1, n_2}) - \frac{\pi}{2}$$

где  $n_1, n_2$  – нормали к плоскостям антенн.

При строительстве данная величина закладывалась в пределах  $0.2^\circ$ . По итогам приёма данная величина оказалась менее  $0.003^\circ$ .

## 1.5 Методика определения азимута

Диаграмма направленности магнитной антенны, малой по сравнению с длиной волны (размеры антенны много меньше длины волны), представляет собой «восьмерку» (см. рис. 3).

Поэтому отношение амплитуд сигналов, полученных на этих антеннах будет определять величину тангенса угла ( $\tan(\phi)$ ) прихода электромагнитной волны. В связи с этим точность определения амплитуд имеет первостепенное значение.

Преобразование параметров электромагнитного сигнала в цифровой можно описать следующим равенством:  $U(t) = k_a \cdot k_p \cdot k_l \cdot k_q \cdot H(t)$ , где  $U(t)$  – мгновенное значение напряжения на входе АЦП,  $k_a$  – коэффициент передачи антенны,  $k_p$  – коэффициент передачи предварительного усилителя,  $k_l$  – коэффициент передачи аналоговой линии,  $k_q$  – коэффициент передачи при квантовании,  $H(t)$  – мгновенное значение величины напряжённости магнитного поля. Учитывая коэффициенты передачи, получим:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{H_{ew}(t)}{H_{ns}(t)}\right) = \arctan\left(\frac{U_{ew}(t) \cdot k_{a\ ns} \cdot k_{p\ ns} \cdot k_{l\ ns} \cdot k_{q\ ns}}{U_{ns}(t) \cdot k_{a\ ew} \cdot k_{p\ ew} \cdot k_{l\ ew} \cdot k_{q\ we}}\right). \quad (1)$$

Так как коэффициенты передачи не зависят от времени, их можно объединить в калибровочный коэффициент, который находится исходя из метода определения азимута и условия равенства магнитных компонент.

$$C = \frac{k_{a\ ns} \cdot k_{p\ ns} \cdot k_{l\ ns} \cdot k_{q\ ns}}{k_{a\ ew} \cdot k_{p\ ew} \cdot k_{l\ ew} \cdot k_{q\ we}}$$

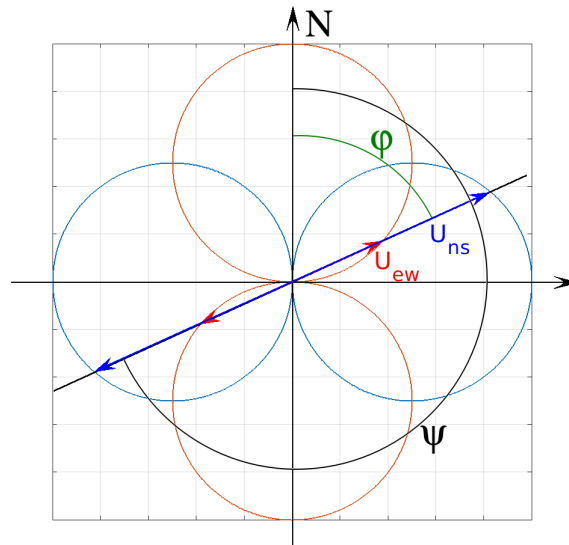


Рис. 3. Определение направления прихода волны по измерениям напряжений на выходах магнитных и электрической антенн, используя свойства их диаграмм направленности, N - север

Figure 3. Determination the direction of wave arrival by measuring the voltages at the outputs of magnetic and electric antennas using the properties of their radiation patterns, N - north

Поскольку угол  $\phi$  может находиться в любой четверти (квадранте), то возникает неоднозначность в определении направления прихода волны, которая устраняется с помощью измерения напряжения на выходе электрической антенны  $U_e$ . В случае, если  $\text{sign}(U_{ns} \cdot U_e) > 0$  и  $\text{sign}(U_{ew} \cdot U_e) > 0$ , то азимутальный угол прихода волны  $\Psi = \phi$  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:

$$\begin{aligned} \text{sign}(U_{ns} \cdot U_e) = 1, \text{sign}(U_{ew} \cdot U_e) = 1 & \quad \psi = \phi + \phi_0 \quad (0^\circ - 90^\circ) \\ \text{sign}(U_{ns} \cdot U_e) = -1, \text{sign}(U_{ew} \cdot U_e) = 1 & \quad \psi = 180^\circ - \phi + \phi_0 \quad (90^\circ - 180^\circ) \\ \text{sign}(U_{ns} \cdot U_e) = -1, \text{sign}(U_{ew} \cdot U_e) = -1 & \quad \psi = 180^\circ + \phi + \phi_0 \quad (180^\circ - 270^\circ) \\ \text{sign}(U_{ns} \cdot U_e) = 1, \text{sign}(U_{ew} \cdot U_e) = -1 & \quad \psi = 360^\circ - \phi + \phi_0 \quad (270^\circ - 360^\circ) \end{aligned}$$

$\phi_0$  – угол поворота антенн относительно географических направлений.

### 1.5.1 Амплитудный метод определения азимута

Амплитудный метод заключается в определении азимута по локальным амплитудным значениям полупериодов ОНЧ-сферика. Приведём пример вычисления азимута.

На рис. 4 представлен пример зарегистрированного атмосферика 20.12.2017 00:17:42.068. По данным WWLLN координаты разряда, источника сферика  $21.4188^\circ$  N,  $152.2412^\circ$  W. Определение наличия сигнала во временной выборке определяется превышением фона в 2 раза. Величина фона вычисляется, как семикратное значение среднеквадратичного отклонения. После определения временного интервала определяются локальные максимумы полупериодов ОНЧ-

сферика. В данном примере, можно выделить 6 значений, подставив которые в формулу (1) и, применив правила устранения неоднозначности, получим ряд значений  $Az = \{106.3709^\circ, 106.6559^\circ, 107.6498^\circ, 108.0114^\circ, 108.4267^\circ, 108.5596^\circ\}$ . Среднее медианное значение результирующего ряда  $Az = 107.8306^\circ$  и будет азимут прихода данного сферика. Решая прямую геодезическую задачу исходя из данных WWLLN истинный азимут источника составляет  $Az = 110.004^\circ$ . Абсолютная погрешность измерения азимута  $\Delta Az = 2.1734^\circ$ .

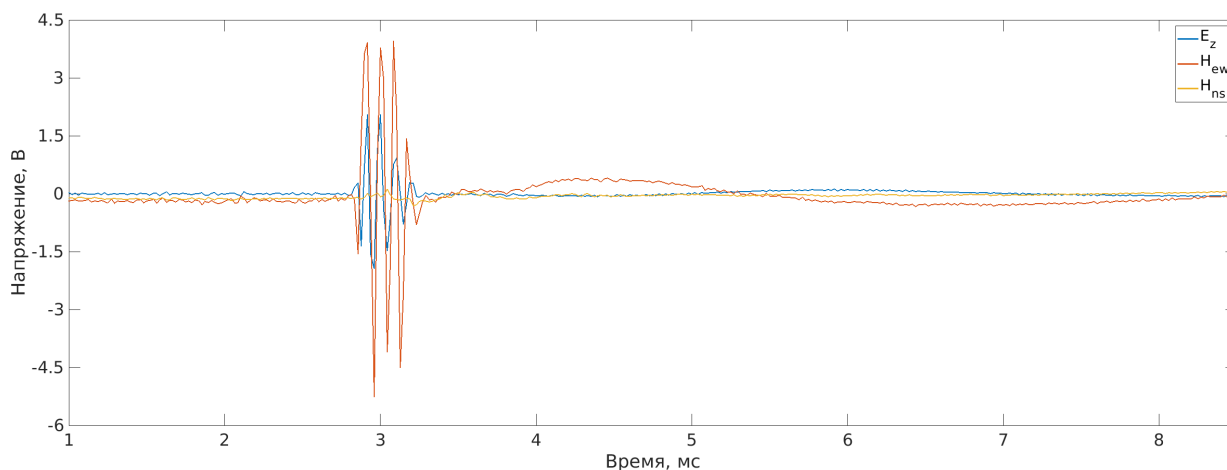


Рис. 4. Пример регистрации сигнала, пришедшего от грозового источника по волноводу Земля - ионосфера.  $H_{NS}$  (север - юг) и  $H_{EW}$  (восток - запад) - магнитные компоненты вектора  $H$ ,  $E_z$  - вертикальная электрическая компонента вектора  $E$ . Частота дискретизации - 48 кГц, время реализации 8.5 мс

Figure 4. An example of recording a signal coming from a lightning source via the Earth-ionosphere waveguide.  $H_{NS}$  (north-south) and  $H_{EW}$  (east-west) are the magnetic components of vector  $H$ ,  $E_z$  is the vertical electrical component of vector  $E$ . The sampling rate is 48 kHz, and the implementation time is 8.5 ms

При определении точности данного метода была использована контрольная выборка состоящая из  $\sim 6 \cdot 10^7$  событий зарегистрированных с 01.01.2017 по 31.12.2017. Итоговая погрешность составила  $\sim 3.5^\circ$ .

### 1.5.2 Спектральный метод определения азимута

Спектральный метод заключается в определении азимута исходя из значений спектральных компонент ОНЧ-сферика. При переходе к спектральным компонентам необходимо немного модифицировать формулу расчета азимута и критерии устранения неоднозначности.

$$\varphi(f) = \arctan \left( \frac{H_{ew}(f)}{H_{ns}(f)} \right) = \arctan \left( \frac{U_{ew}(f)}{U_{ns}(f)} \cdot C(f) \right)$$

где  $C(f) = \frac{k_{a\ ns}(f) \cdot k_{p\ ns}(f) \cdot k_{l\ ns}(f) \cdot k_{q\ ns}}{k_{a\ ew}(f) \cdot k_{p\ ew}(f) \cdot k_{l\ ew}(f) \cdot k_{q\ ew}}$ , коэффициенты определяемые в ходе калибровочных измерений.

Поиск атмосфериков осуществляется на временной 15 минутной выборке, во всех каналах регистрации. Выбор интервала продиктован суточным изменением спектральной плотности мощности (СПМ) шума. Так как длительность сфериков составляет во временном интервале от 0.5 до 10 мс, то для наибольшей точности определения азимута длина временного интервала выбрана по максимальной длительности сигнала, то есть 10 мс или 480 точек (при частоте дискретизации 48 кГц). Вычисления спектральной плотности мощности осуществляются с помощью оконного дискретного преобразования Фурье (ДПФ), с окном Чебышёва. Также для повышения точности в алгоритме применяется 95% перекрытие окна.

В результате преобразований получаем хронограмму СПМ. Величина СПМ шума для конкретной частоты определяется как среднее медианное значение. Бины (значение СПМ на определённой частоте в определённом интервале времени), относящиеся к сигналу, определяются по критерию превышения СПМ шума на 7 дБ. Совокупность бинов, относящихся к одной и той же временной метке, составляет спектр атмосферика. Отношение спектров атмосферика, полученных с магнитных антенн, образуют ряд азимутов, со средним количеством значений более 100. Это позволяет минимизировать случайную погрешность на порядок. Приведём расчет азимута источника сферика, приведенного на рис. 4.

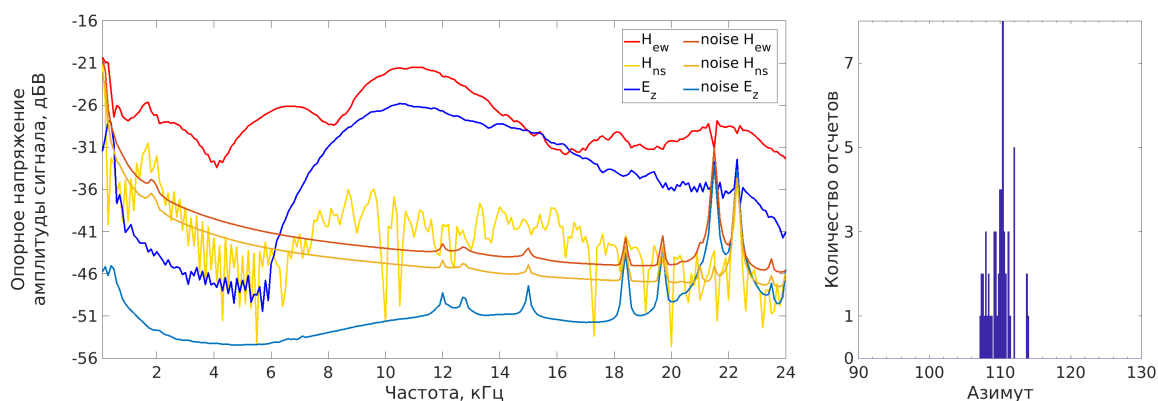


Рис. 5. Спектральная плотность мощности сигнала и шума по компонентам поля (слева); гистограмма азимутов вычисленных по частотам (справа)

Figure 5. Spectral density of signal and noise power by field components (left); histogram of azimuths calculated by frequencies (right)

Из приведённых на рис. 5 графиков видно, что не все точки удовлетворяют условию превышения шума. Если для компонент Восток-Запад магнитного поля и вертикальной электрической ему соответствуют 213 и 185 соответственно, то для компоненты Север-Юг лишь 54. Так как основным критерием выбора достоверных значений является превышение шума во всех каналах, то в расчет азимута войдут лишь эти 54 точки. Гистограмма, приведённая на рис. 5 показывает, что азимуты всех расчетных компонент находятся в диапазоне от  $107.25^\circ$  до  $114.05^\circ$ . Среднее медианное значение результирующего ряда  $Az = 110.191^\circ$ , абсолютная погрешность измерения азимута  $\Delta Az = 0.187^\circ$ .

Проверка на контрольной выборке показала, что погрешность данного метода составляет  $\sim 0.2^\circ$ .

## 2 Калибровка ОНЧ–пеленгатора

Суть калибровки магнитных антенн заключается в том, чтобы навести одинаковый магнитный поток. Это возможно, если магнитный контур, выступающий в качестве эталонного источника, будет ориентирован под углом  $45^\circ$  к плоскостям антенн. Калибровочный контур состоит из одного витка диаметром  $d = 1$  м, что позволяет пренебречь изменением резонансных характеристик самих антенн. Собственный резонанс калибровочного контура составляет  $\sim 100$  кГц.

Вычисления калибровочных коэффициентов, входящих в расчёт, зависит от выбранной методики определения азимута источника. Для амплитудного метода на калибровочный виток в течение 15 мин. подаётся сигнал белого шума в диапазоне 30 Гц – 24 кГц. Количество мгновенных значений амплитуд составляет  $\sim 4 \cdot 10^7$ , что позволяет минимизировать случайную погрешность определения калибровочного коэффициента до  $\sim 10^{-2}$ .

Для спектрального метода на калибровочную антенну посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) подаётся немодулированный монохроматический сигнал постоянной амплитуды. Длительность сигнала составляет 1 с. На протяжении часа, каждую секунду частота дискретно увеличивается от 5 Гц до 18 кГц с шагом 5 Гц.

В результате проведенной калибровки от 26.07.2023 были получены результаты, представленные на графиках рис. 6.

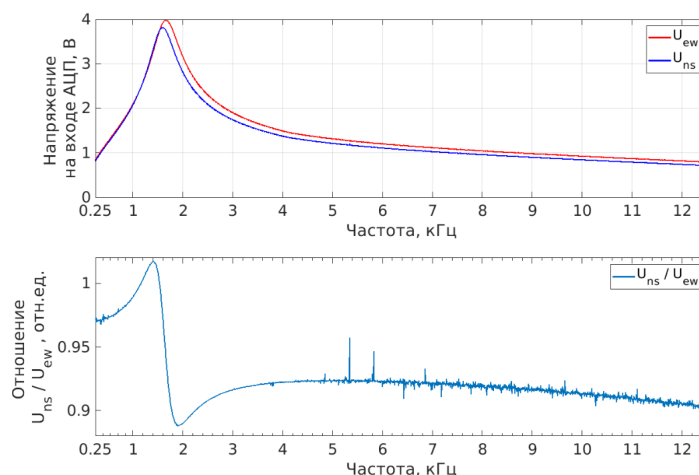


Рис. 6. Результаты калибровки 26.07.2023: сверху – АЧХ антенн; внизу – отношение коэффициентов передачи антенн

Figure 6. Calibration results on July 26, 2023: antenna amplitude-frequency response at the top; antenna transmission ratio at the bottom

Также результаты калибровки позволяют проверить фазировку антенн и величину поворота антенного комплекса относительно географических направлений, который возник из-за особенностей грунта в точке установки.

## 2.1 Проверка комплекса

Для проверки работоспособности комплекса выбран ряд реперных источников, одним из которых являются радиостанции точного времени РСДН 20, а в качестве нерегулярных источников выбраны грозовые разряды, лоцированные сетью WWLLN. Все данные по грозовым разрядам для удобства сведены в таблицу 1:

Таблица 1

Сведения о расчёте пеленга грозовых разрядов  
Information about calculating the bearing of lightning discharges

Время	Долгота	Широта	Азимут геодезический	Азимут измеренный
18:07:35.468088	37.2179° с.ш.	133.6975° в.д.	237.2968°	236.9578°
18:07:35.717809	36.717° с.ш.	133.7047° в.д.	236.4838°	237.094°
18:10:49.334914	37.1318° с.ш.	133.7856° в.д.	237.019°	237.6311°
18:19:25.025042	37.9711° с.ш.	134.0605° в.д.	237.9813°	238.8637°

### Нахождение азимута радиостанций.

Краткая характеристика системы точного времени, базирующейся на сети радиостанций РСДН-20 «Альфа».

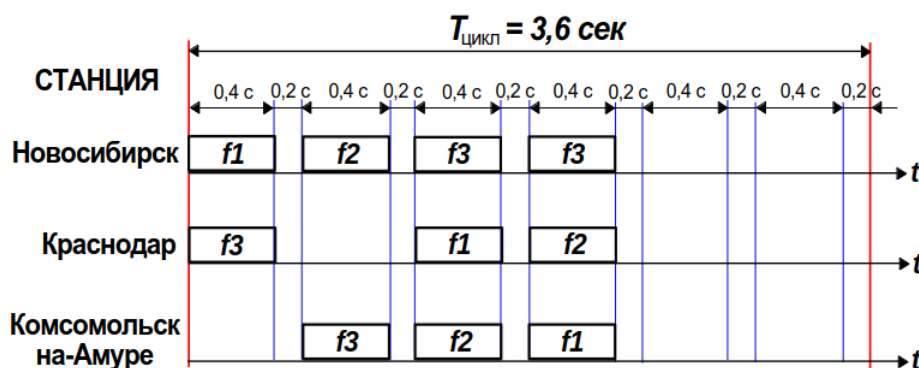


Рис. 7. Временные диаграммы сигналов РСДН-20 («Альфа»).  $T_{цикл}$  - длительность последовательности сигналов;  $t$  - время;  $f_1, f_2, f_3$  - частоты сигналов, равные 11.905, 12.649, 14.881 кГц, соответственно

Figure 7. Time diagrams of RSDN-20 (Alpha) signals.  $T_{cycle}$  is the duration of the signal sequence;  $t$  is the time;  $f_1, f_2, f_3$  are the signal frequencies equal to 11.905, 12.649, 14.881 kHz, respectively

Система «Альфа» состоит из четырёх передатчиков (рис. 7), которые расположены в районах:

1. Новосибирск (55°45'31" с. ш. 84°26'45" в. д.),
2. Краснодар (45°24'12" с. ш. 38°09'30" в. д.),

3. Комсомольск-на-Амуре (п. Эльбан) ( $50^{\circ}04'21''$  с. ш.  $136^{\circ}36'34''$  в. д.),

4. Ревда, Мурманская обл. ( $68^{\circ}02'13''$  с. ш.  $34^{\circ}40'43''$  в. д.).

Структура пакета сигнала точного времени хорошо видна на примере спектрохронограмм, полученных 06.04.2017 22:41:15.215482 UTC (рис. 8) и 25.03.2024 17:05:49.280069 UTC (рис. 9).

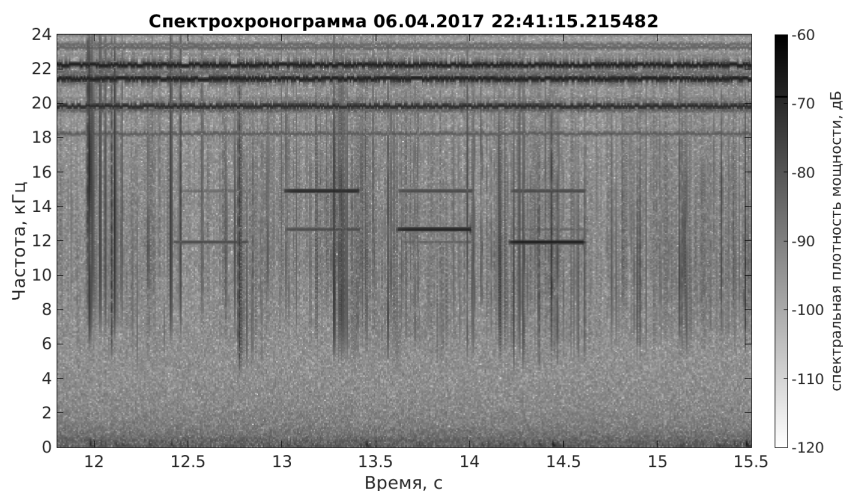


Рис. 8. Спектрохронограмма записи электрической компоненты, полученная 06.04.2017 22:41:15.215482 с помощью комплекса ОНЧ-пеленгатора

Figure 8. Spectro chronogram of the record of an electrical component, obtained on April 06, 2017 at 22:41:15.215482 UT using the VLF direction finder complex

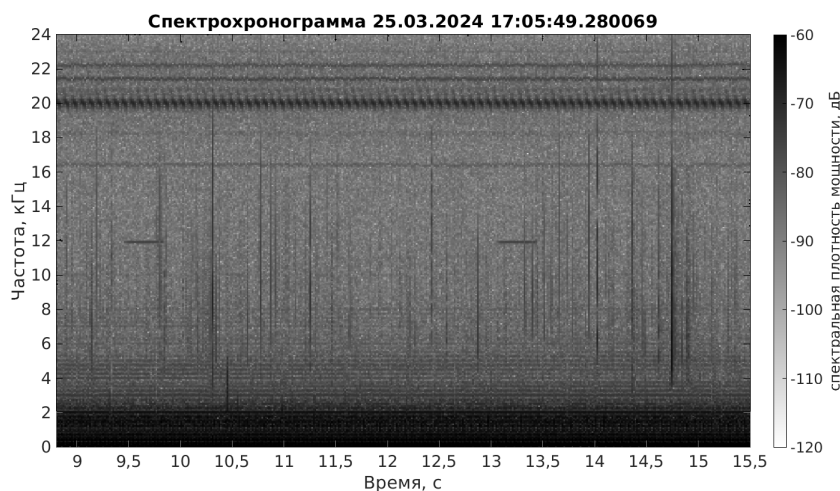


Рис. 9. Спектрохронограмма записи электрической компоненты полученная 25.03.2024 17:05:49.280069 с помощью комплекса ОНЧ-пеленгатора

Figure 9. Spectro chronogram of the record of an electrical component obtained on March 25, 2024 at 17:05:49.280069 UT using the VLF direction finder complex

Частота сигнала составляет 11.905 кГц (рис. 10) со средним отношением сигнал/шум 9.8 дБ, что говорит об удовлетворительном приёме сигнала, достаточном для выделения полезного сигнала на фоне шумов.

При помощи полосового фильтра выделен сигнал во всех компонентах поля, описанных в работе [25] и показанных на рис. 11.

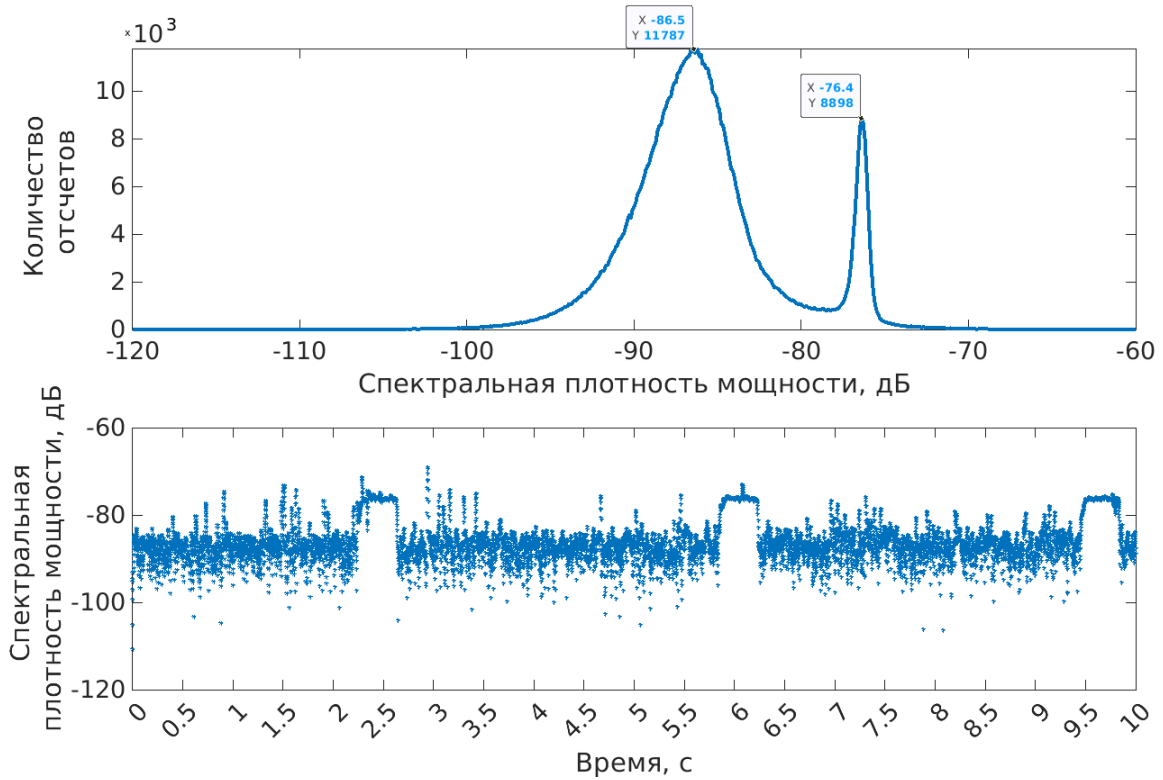


Рис. 10. Гистограмма распределения количества временных интервалов от спектральной плотности мощности на частоте 11.905 кГц (верх), зависимость спектральной плотности мощности от времени (низ)

Figure 10. Histogram of the distribution of the number of time intervals from the spectral power density at a frequency of 11.905 kHz (top), dependence of the spectral power density on time (bottom)

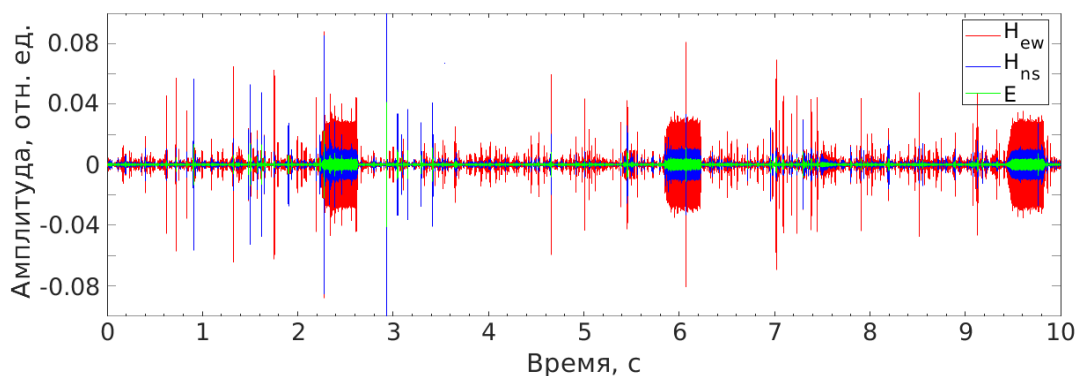


Рис. 11. Волновая форма сигналов компонент поля после применения полосового фильтра  
Figure 11. Waveform of the field component signals after applying a bandpass filter

На рис. 12 показан азимут радиостанции по прямым вычислениям, который составляет  $238.80^\circ$ . С учетом поправки на поворот антенны получим  $263.03^\circ$ . Абсолютная погрешность составила  $+3.79^\circ$ .

Столь высокой погрешности можно избежать, если принять поправку на степень поляризации сигнала, где угол  $\varphi$  необходимо вычислять по следующей формуле:

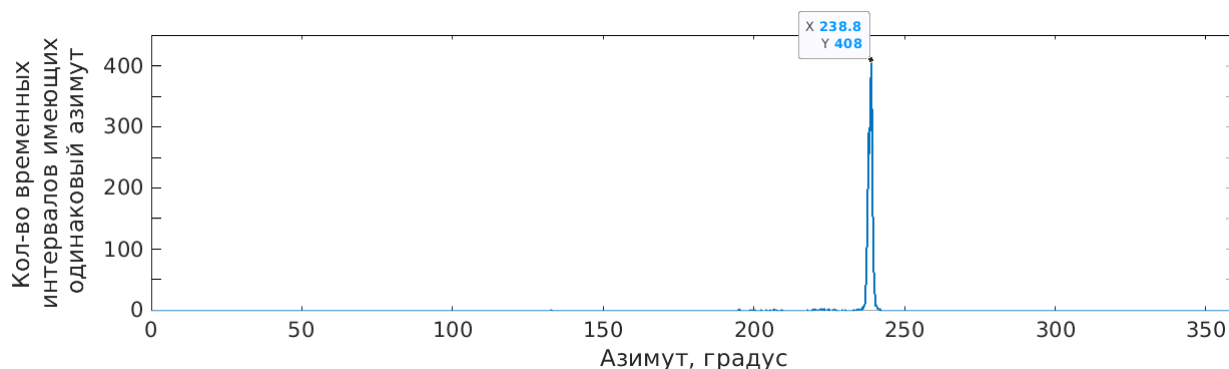


Рис. 12. Зависимость количества интервалов анализируемого ряда, содержащих сигнал, от азимутального угла

Figure 12. Dependence of the number of intervals of the analyzed series containing the signal on the azimuth angle

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{2 \frac{H_{ew}}{H_{ns}} \cos(\delta)}{1 - \left(\frac{H_{ew}}{H_{ns}}\right)^2} \quad (2)$$

где  $H_{ew}$ ,  $H_{ns}$  — амплитуды сигналов в каналах ВЗ и СЮ,  $\delta$  — сдвиг фазы между сигналами каналов.

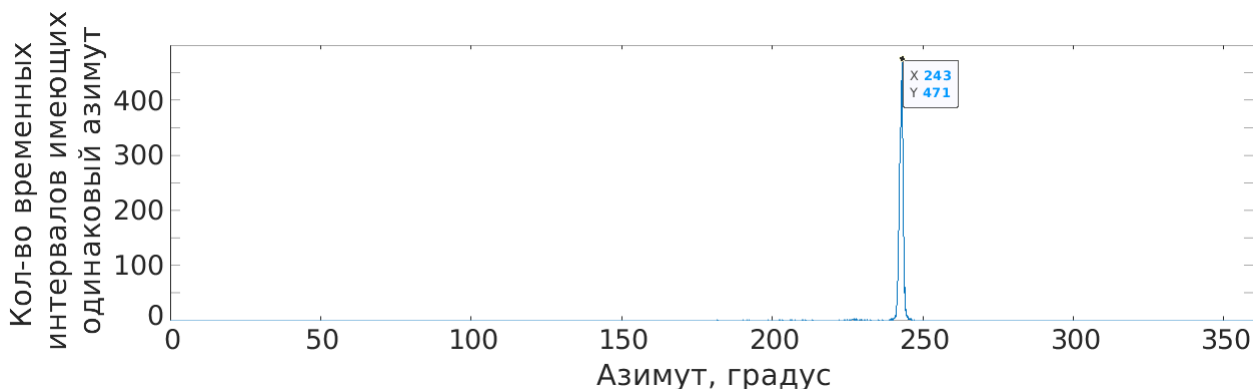


Рис. 13. Зависимость количества интервалов анализируемого ряда, содержащих сигнал, от азимутального угла, с учетом поправки на степень поляризации сигнала

Figure 13. Dependence of the number of intervals of the analyzed series containing the signal on the azimuth angle, taking into account the signal polarization degree

Согласно поправке (2) на эллиптическую поляризацию сигнала, азимут радиостанции составляет  $243^\circ$  с учетом поворота антенны получим  $267.23^\circ$  (рис. 13). Абсолютная погрешность при данном подходе составила  $-0.21^\circ$ .

## Заключение

В работе подробно описаны: антенный комплекс, методики определения азимута, калибровка и проверка комплекса. Дано описание разработанного метода определения азимута по спектральным компонентам электромагнитного сигнала. Особое внимание уделено проверке достоверности полученным данным.

В результате были синхронизированы базы данных, полученные с комплекса радионаблюдений WWLLN и ОНЧ-радиопеленгатора [25]. Спектральный метод определения азимута позволил уменьшить погрешность ранее используемого метода. В результате появилась возможность провести исследование связи атмосфериков и вистлеров с высотными электрическими разрядами грозовой активности метеорологического и вулканического происхождения. Результаты исследований с использованием полученных данных опубликованы в работах [14, 27].

**Благодарности.** Авторы выражает благодарность и признательность сотрудникам Лаборатории электромагнитных излучений и Группы информационных технологий ИКИР ДВО РАН Дмитрию Викторовичу Санникову, Александру Владимировичу Кайсину, Ивану Евгеньевичу Стасию, Аркадию Вениаминовичу Иванову, Ивану Владимировичу Жидкову – всем, кто поддерживал и помогал, обеспечивая непрерывную функциональность технических комплексов, экспериментальных установок, оказывая помощь в написании специализированных научных компьютерных программ и программ общего назначения, обеспечении передачи данных, поддержке всех информационных систем в рабочем состоянии. Особую благодарность авторы выражают к.ф.-м.н. Нине Володаровне Черневой за подготовку статьи к печати и ценные замечания.

## Аббревиатуры

ОНЧ	Очень Низкие Частоты
АЦП	Аналого-Цифровой Преобразователь
ЭА	Электрическая Антенна
ПУ	Предварительный Усилитель
WWLLN	World Wide Lightning Location Network (Всемирная сеть определения местоположения молний)
СПМ	Спектральная Плотность Мощности
ЦАП	Цифро-Аналоговый Преобразователь

## Список литературы


1. Альперт Я. Л. *Распространение электромагнитных волн и ионосфера*. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Александров М. С. и др. *Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ*. М.: Наука, 1972. 195 с.
3. Распопов О. М., Клейменова Н. Г. *Возмущения электромагнитного поля Земли: в 3 ч. Часть 3. ОНЧ-излучения*. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1977. 144 с.
4. Дружин Г. И., Чернева Н. В., Мельников А. Н. Гроза в районе полуострова Камчатка по данным наблюдений за ОНЧ-излучением // *Метеорология и гидрология*, 2011. Т. 7, С. 32–39.
5. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 504 с.
6. Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospheric // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953. vol. 246, no. 908, pp. 113-141 <https://doi.org/10.1098/rsta.1953.0011>.

7. Угаров В. А., Гершман В. Н. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // *Успехи физических наук*, 1960. Т. 72, № 10, С. 235-271 <https://doi.org/10.3367/UFNr.0072.196010c.02355>.
8. Collier A. B., Bremner S., Lichtenberger J., Downs J. R., Rodger C. J., Steinbach P., McDowell G. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand // *Annales Geophysicae*, 2010. vol. 28, no. 2, pp. 499–513 <https://doi.org/10.5194/angeo-28-499-2010>.
9. Behnke S. A., Thomas, R. J., Krehbiel P. R., McNutt S. R. Spectacular lightning revealed in 2009 Mount Redoubt eruption // *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2012. vol. 93, no. 20, pp. 193–194 <https://doi.org/10.1029/2012EO200001>.
10. Behnke S. A., Thomas, R. J., McNutt S. R., Schneider D. J., Krehbiel P. R., Rison William, Edens H. E. Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt volcano // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013. vol. 259, pp. 214–234 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.010>.
11. Behnke S. A., McNutt S. R. Using lightning observations as a volcanic eruption monitoring tool // *Bull. Volcanol*, 2014. vol. 76, pp. 847 <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0847-1>.
12. Antel C., Collier A. B., Lichtenberger J., Rodger C. J. Investigating Dunedin whistlers using volcanic lightning // *Geophysical Research Letters*, 2014. vol. 41, no. 13, pp. 4420–4426 <https://doi.org/10.1002/2014GL060332>.
13. 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 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016. vol. 16, no. 3, pp. 871–874 <https://doi.org/10.5194/nhess-16-871-201>.
14. 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, pp. 1503 <https://doi.org/10.3390/atmos15121503>.
15. Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. *Радиотехнические методы местопредопределения грозовых очагов*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986.
16. Козлов В. И., Маркова А. Ю., Шабеганова С. Н. Погрешности методов наблюдения грозовых разрядов одно- и двухпунктовыми системами грозолокации // *Наука и образование*, 2010. Т. 1, С. 7–12.
17. Дружин Г. И., Козлов В. И., Лаптев А. Д., Муллаяров В. А. Измерение углов прихода квазигармонических ОНЧ-сигналов // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1988. Т. 28, № 1, С. 164–168.
18. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р. Инструментальные наблюдения гроз в Якутии в 2003–2006 годах // *Известия вузов. Радиофизика*, 2008. Т. LI, № 10, С. 825–829.
19. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. Т. 8, С. 257–262.
20. Капустина О. В., Дружин Г. И., Никифоров В. Е. Передвижной комплекс регистрации низкочастотных электромагнитных волн // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2024. Т. 29, С. 76–81.
21. Rodger C. J., Werner S., Brundell J. B., Lay E. H., Thomson N. R., Holzworth R. H., Dowden R. L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study // *Annales Geophysicae*, 2006. vol. 24, no. 12, pp. 3197–3214, <https://doi.org/10.5194/angeo-24-3197-2006>.
22. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Тарабукина Л. Д., Торопов А. А. Временной интервал между ОНЧ- и КНЧ-радиоимпульсами разрядовой молнии // *Вестник Якутского государственного университета*, 2009. Т. 6, С. 13–18.
23. Abarca Sergio F., Corbosiero Kristen L., Galarneau Thomas J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010. vol. 115 <https://doi.org/10.1029/2009JD013411>.
24. Hutchins M. L., Jacobson Abram R., Holzworth Robert H., Brundell James B. Azimuthal dependence of VLF propagation // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013. vol. 118, pp. 5808–5812 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104>.
25. Дружин Г. И., Пухов В. М., Санников Д. В., Малкин Е. И. ОНЧ-пеленгатор грозовых разрядов // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2019. Т. 27, № 2, С. 95–104 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104>.


26. Дружин Г.И., Пухов В.М., Санников Д.В., Малкин Е.И. ОНЧ-регистратор грозовых разрядов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки, 2019. Т. 27, № 2, С. 105–116 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2019-27-2-105-1164>.
27. Akbashev R.R., Malkin E.I., Cherneva N.V. A Characteristic Electrostatic Structure of Eruptive Plumes Emitted by Large Explosive Eruptions of Shiveluch and Bezymianny Volcanoes, Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology, 2024. no. 2 (11), pp. 323–339 <https://doi.org/10.1134/S0742046324700672>.

### Информация об авторах



*Малкин Евгений Ильич* ✉ – научный сотрудник  
Лаборатории электромагнитных излучений Института  
космофизических исследований и распространения  
радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  
 ORCID 0000-0001-8037-1335.



*Дружин Геннадий Иванович* ✉ – кандидат физико-  
математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
Лаборатории электромагнитных излучений Института  
космофизических исследований и распространения  
радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  
 ORCID 0000-0002-1009-1044.


## References

- [1] Alpert J. L. Propagation of electromagnetic waves and ionosphere. М.: «Nauka», 1972 (in Russian).
- [2] Alexandrov M. S. and et. al. Fluctuations of the Earth's electromagnetic field in the ULF range. М.: «Nauka», 1972 (in Russian).
- [3] Raspopov O. M., Kleimenova N. G. Disturbances of the Earth's electromagnetic field: at 3 a.m. Part 3. VLF radiation. L.: «Publishing House of Leningrad University», 1977 (in Russian).
- [4] Druzhin G. I., Cherneva N. V., Melnikov A. N. Thunderstorm in the kamchatka peninsula area according to observations of vlf radiation. *Meteorology and hydrology*, 7:32–39, 2011 (in Russian).
- [5] Davis K. Radio waves in the ionosphere. М.: «Mir», 1973 (in Russian).
- [6] Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospheric. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 246(908):113–141, 1953.
- [7] Gershman B. N., Ugarov V. A. Propagation and generation of low-frequency electromagnetic waves in the upper atmosphere. *UFN*, 72(10):235–271, 1960 (in Russian).
- [8] Collier A. B., Bremner S., Lichtenberger J., Downs J. R., Rodger C. J., Steinbach P., McDowell G. Global lightning distribution and whistlers observed at dunedin, new zealand. *Annales Geophysicae*, 28(2):499–513, 2010.
- [9] Behnke S. A., Thomas R. J., Krehbiel P. R., McNutt S. R. Spectacular lightning revealed in 2009 mount redoubt eruption. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(20):193194, 2012.
- [10] Behnke S. A., Thomas R. J., McNutt S. R., Schneider D. J., Krehbiel P. R., Rison W., Edens H. E. Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of redoubt volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259:214–234, 2013.
- [11] Behnke S. A., McNutt S. R. Using lightning observations as a volcanic eruption monitoring tool. *Bull. Volcanol*, 76:847, 2014.
- [12] Antel C., Collier A. B., Lichtenberger J., Craig J., Rodger. Investigating dunedin whistlers using volcanic lightning *Geophysical Research Letters*, 41(13):4420–4426, 2014.
- [13] Shevtsov B. M., Firstov P. P., Cherneva N. V., Holzworth R. H., and Akbashev R. R. Lightning and electrical activity during the shiveluch volcano eruption on 16 november 2014. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3):871–874, 2016.
- [14] 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, pp. 1503. DOI: 10.3390/atmos15121503.
- [15] Kononov I. I., Petrenko I. A., Snegurov V. S. Radiotekhnicheskiye metody mestoopredeleniya grozovykh ochagov. Leningrad: «Gidrometeoizdat». 1986 (In Russian).
- [16] Kozlov V. I., Markova A. Yu., Shabaganova S. N. Pogreshnosti metodov nablyudeniya grozovykh razryadov odno- i dvukhpunktovymi sistemami grozoloatsii, *Nauka i obrazovaniye*, 2010, vol.1, pp. 7–12 (In Russian).
- [17] Druzhin G. I., Kozlov V. I., Laptev A. D., Mullayarov V. A. Izmereniye uglov prikhoda kvazigarmonicheskikh ONCh-signalov, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1988, vol. 28, no. 1, pp. 164–168 (In Russian).
- [18] Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Karimov R. R. Instrumentalnyye nablyudeniya groz v Yakutii v 2003–2006 godakh, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2008, vol. LI, no. 10, pp. 825–829 (In Russian).


- [19] Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Karimov R. R. Prostranstvennoye raspredeleniye plotnosti grozovykh razryadov na Vostoke Rossii po dannym distantsionnykh nablyudeniyy. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 257-262 (In Russian).
- [20] Kapustina O. V., Druzhin G. I., Nikiforov V. E. Peredvizhnoy kompleks registratsii nizkочастотnykh elektromagnitnykh voln, *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, 2024, vol. 29, pp. 76–81 (In Russian).
- [21] Rodger C. J., Werner S., Brundell J. B., Lay E. H., Thomson N. R., Holzworth R. H., Dowden R. L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study, *Annales Geophysicae*, 2006, vol. 24, no. 12, pp. 3197–3214.
- [22] Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Tarabukina L. D., Toropov A. A. Vremennoy interval mezhdu ONCh- i KNCh-radioimpulsami razryadovoy molnii, *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, vol. 6, pp. 13-18 (In Russian).
- [23] Abarca S. F., Corbosiero K. L., Galarneau T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, vol. 115.
- [24] Hutchins M. L., A. R. Jacobson R. H. Holzworth, Brundell J. B., Azimuthal dependence of VLF propagation, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2013, vol. 118, pp. 5808–5812. DOI: 10.1002/jgra.50533.
- [25] Druzhin G. I., Pukhov V. M., Sannikov D. V., Malkin E. I. ONCh-pelengator grozovykh razryadov, *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki.*, 2019, vol.27 (2), pp. 95-104.
- [26] Druzhin G. I., Pukhov V. M., Sannikov D. V., Malkin E. I., Stasiy I. E. VLF– recorder for the study of natural radio emission, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2019, vol.27 (2), pp. 105-116.
- [27] Akbashev R. R., Malkin E. I., Cherneva N. V. A Characteristic Electrostatic Structure of Eruptive Plumes Emitted by Large Explosive Eruptions of Shiveluch and Bezymianny Volcanoes, Kamchatka. *J. Volcanolog. Seismol*, 2024, vol. 18, pp. 323-339.

### Information about the authors



*Malkin Evgeny Ilyich* ✉ – Researcher at the Laboratory of Electromagnetic Radiation, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-8037-1335.



*Druzhin Gennady Ivanovich* ✉ – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Electromagnetic Radiation, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-1009-1044.