

## Однопунктовая локация мощных грозových разрядов по всплескам СНЧ шума

Ю. В. Аристов, П. В. Блюх, О. В. Буданов, Б. В. Лазебный, В. Е. Пазнухов, А. Г. Рохман

Радиоастрономический институт НАН Украины  
61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 17 мая 2000 г.

В работе описан измерительный комплекс для исследования естественного электромагнитного шума в диапазоне СНЧ (4÷40 Гц). Синхронно регистрируются вертикальная составляющая электрического поля и две ортогональных компоненты горизонтального магнитного поля.

Анализ всплесков СНЧ излучения позволяет произвести локацию мощных молниевых разрядов в глобальном масштабе из одного пункта наблюдения. При этом дальность определяется по форме спектра компонент электромагнитного поля и импеданса, а пеленг источника находится с помощью вектора Пойнтинга. В качестве иллюстрации приведена карта глобального распределения мощных грозových разрядов.

У роботі описано вимірювальний комплекс для дослідження природного електромагнітного шуму в діапазоні ННЧ (4÷40 Гц). Синхронно реєструється вертикальна складова електричного поля та дві ортогональні компоненти горизонтального магнітного поля.

Аналіз сплеску ННЧ випромінювання дозволяє провести локацію потужних блискавок у глобальному масштабі з одного пункту спостереження. При цьому дальність визначається за формою спектра компонент електромагнітного поля та імпедансу, а пеленг джерела знаходиться за допомогою вектора Пойнтинга. Як ілюстрація дається карта глобального розподілу потужних грозových розрядів.

### 1. Введение

Известно, что основным источником естественного электромагнитного шума в диапазоне частот от единиц до десятков герц являются молниевые разряды [1]. Поскольку число разрядов, действующих почти одновременно по всему земному шару, очень велико (~100 разрядов в секунду), то радишум представляет собой широкополосный сигнал. Если время усреднения составляет единицы минут и более, в спектре такого сигнала наблюдаются отчетливые максимумы. Максимумы спектральной плотности соответствуют собственным частотам сферического резонатора, образованного поверхностью Земли и нижней границей ионосферы. Это так называемые шумановские или глобальные резонансы (ШР), частоты которых равны ~8, 14, 20, 26, 32 ... Гц, а добротности составляют несколько единиц [2]. Вследствие большого времени усреднения при построении спектров шума индивидуальные отличия молниевых разрядов полностью исчезают, в этом случае различать грозových очаги, порождающие этот шум, весьма затруднительно.

Однако в электромагнитном СНЧ шуме сравнительно редко (несколько раз в минуту) встречаются мощные импульсные сигналы или так называемые всплески. Их амплитуда превышает фоновый уровень на величину до 20 дБ,

а длительность колеблется от долей до 1 с. Предполагается, что эти всплески порождены одиночными удаленными, но весьма мощными электрическими разрядами. Среди них могут быть и молнии, бьющие вверх – от облаков к ионосфере. Это так называемые “спрайты”, “эльфы” и “голубые струи” [6]. Благодаря тому, что в наблюдаемых всплесках проявляется интерференция прямых и кругосветных волн, возникает возможность по виду спектра всплеска судить о расстоянии до источника [3]. В то же время, определив расстояние до источника, еще нельзя ничего сказать о его местоположении, так как необходимо знать также и направление прихода сигнала. Можно осуществить локацию, определяя дальность в двух и более удаленных друг от друга точках. Хотя этот способ в принципе достаточно прост, но его практическое осуществление требует выделения одного и того же всплеска при независимых наблюдениях в разных пунктах. Такие измерения были проведены на дальномерной базе ~5000 км (Харьков – Иркутск) и их результаты приведены в статье [4].

Первые радиофизические исследования глобальной грозовой активности осуществлялись с использованием характерных свойств ШР [1]. В настоящее время разработаны и другие, более совершенные методы. На американском континенте регулярно работает система детектирова-

ния молний по их радиоизлучению NLDN (National Lightning Detection Network) [9]. Кроме того, непосредственная регистрация молниевых разрядов осуществляется космическими аппаратами в ИК и оптическом диапазонах, в частности, спутниковой системой OTD (Optical Transient Detector), которая начала работу в 1995 г. и обеспечивает глобальное наблюдение молний с высокой степенью точности определения координат, но с ограниченной площадью обзора в данный момент времени [9].

Перечисленные выше методы имеют свои достоинства и недостатки. Для того чтобы наглядно их оценить, мы приводим здесь данные, взятые из работы [9] (см. табл. 1).

Надо признать, что по всем параметрам, кроме поля обозрения, ШР уступают другим методам. Зато поле обозрения оказывается по настоящему глобальным только с использованием ШР. Кроме того, ШР-мониторинг несравненно дешевле всех остальных методов.

Число обсерваторий, в которых исследуются ШР, не очень велико. Они расположены в основном в США, Японии и Англии. На Украине действует только одна обсерватория Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины вблизи Харькова. Очевидно, что наиболее надежные данные могут быть получены при согласованной работе всех имеющихся систем локации молний. В данной статье мы сообщаем о возможностях харьковской группы и приводим некоторые результаты наших наблюдений.

Локация молний, порождающих мощные СНЧ всплески, осуществляется путем независимого определения дальности  $R$  до разряда и его пеленга  $\alpha$ . С этой целью синхронно регистрируются вертикальная составляющая электрического поля  $E_z$  и две ортогональные горизонтальные составляющие магнитного поля  $H_x$  и  $H_y$ . Расстояние находится путем сравнения расчетных и наблюдаемых спектров  $E_z(\omega)$  и  $H(\omega)$

( $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ ), а также соответствующих спектров импеданса  $Z(\omega) = E_z(\omega)/H(\omega)$  [1]. Наличие шумов (непрерывный СНЧ фон и местные помехи) приводит к тому, что результаты определения дальности  $R$  по разным спектрам иногда не совпадают друг с другом. Эти измерения из дальнейшей обработки исключались. Для тех всплесков, дальность которых определена, находятся пеленги  $\alpha$  путем сравнения сигналов двух ортогональных магнитных антенн ( $\text{tg}\alpha = H_x/H_y$ ). Вопрос о возможной неоднозначности и способе ее устранения обсужден далее.

## 2. Измерительный комплекс

Описанные ниже измерения были выполнены в августе 1999 г. на СНЧ обсерватории РИНАН Украины в с. Мартова Харьковской области (50° с. ш., 37° в. д.). В эксперименте использовались

- вертикальная электрическая антенна;
- два ортогональных горизонтальных магнитных индукционных датчика;
- многоканальное приемное устройство;
- накопитель информации на базе ПЭВМ;
- обрабатывающая ПЭВМ с пакетом программ обработки.

Вертикальная электрическая антенна представляла собой металлическую сферу диаметром ~1 м, поднятую на высоту ~12 м. Сфера конструктивно выполнена из металлических прутьев в виде полой ажурной конструкции. Такая конструкция имеет меньший вес и меньшее лобовое сопротивление ветру по сравнению с полым металлическим шаром и, следовательно, меньшие помехи, связанные с ветром [5]. Изоляция проводящей сферы от металлического 12-метрового штыря выполнена из фторопласта.

Таблица 1. Сравнение различных систем локации молний

	ШР	NLDN	OTD
Исходный сигнал	кратковременные СНЧ всплески	импульсы радиоизлучения в диапазонах СДВ и СВ	оптические вспышки
Поле обозрения, км <sup>2</sup>	глобальное (5.1·10 <sup>8</sup> )	локальное (1.4·10 <sup>7</sup> )	локальное (1.7·10 <sup>6</sup> )
Эффективность обнаружения	низкая (0.001÷0.1)	высокая (0.7÷0.9)	высокая (0.6÷0.8)
Точность определения координат, км	(0.5÷2)·10 <sup>3</sup>	(0,01÷0,02)·10 <sup>3</sup>	(0,01÷0,2)·10 <sup>3</sup>

Индукционные датчики горизонтального магнитного поля представляют собой пермаллоевые стержни, на которые намотано 30000 витков медного провода. Датчики заключены в металлический экран, предохраняющий их от электрической наводки. Коэффициент преобразования системы "магнитная антенна – антенный усилитель" в рабочей полосе частот 4÷40 Гц составляет 70 мВ/пТл. Магнитная антенна и антенный усилитель имеют плоскую амплитудно-частотную характеристику в рабочем диапазоне 4÷40 Гц.

Антенный усилитель (АУ) электрической антенны используется в качестве устройства, согласующего большое выходное сопротивление антенны с низким входным сопротивлением приемного устройства, поэтому входное сопротивление АУ должно быть достаточно большим. В нашем случае оно равно ~3·10<sup>9</sup> Ом. Коэффициент передачи АУ близок к 1. Уровень собственных шумов определяется в основном шумами в низкочастотной области рабочей полосы и составляет ~1·10<sup>-6</sup> В·Гц<sup>-1/2</sup>.

Приемное устройство представляет собой 4-канальный усилитель низкой частоты [5]. Приемные каналы идентичны, каждый из них состоит из фильтров низких и высоких частот, режекторов помех 50 Гц и имеет рабочую полосу 4÷40 Гц. Фильтры низких и высоких частот имеют затухание ~46 дБ на октаву. Режекторные фильтры выполнены по схеме двух Т-образных расстроенных мостов. Выход приемного устройства согласован с 12-разрядным АЦП, через который информация со всех каналов поступает в накапливающую ПЭВМ. Обработка данных проводится с помощью компьютера.

### 3. Определение дистанции до грозного разряда

В работе [3] описан метод определения расстояния до источника СНЧ всплеска – единичного вертикального грозного разряда. Суть метода состоит в том, что для экспериментально полученного спектра всплеска можно подобрать максимально похожий расчетный спектр  $E_z$  и  $H$ . Расчеты спектров СНЧ всплеска были выполнены для различных удалений от источника. В результате сравнения экспериментального спектра с набором расчетных удается определить расстояние до источника СНЧ всплеска. Расчетные спектры полей  $E_z$  и  $H$  вычислялись по формулам, приведенным в [1]:

$$E_z(\omega, \theta) = \frac{4i\pi p(\omega)}{a^2(b-a)} \frac{v(v+1)}{\omega} P_v(\cos(\pi-\theta)) / \sin \pi v, \quad (1)$$

$$H(\omega, \theta) = \frac{4\pi p(\omega)}{ac(b-a)} \frac{d}{d\theta} \langle P_v(\cos(\pi-\theta)) \rangle / \sin \pi v, \quad (2)$$

где  $p(\omega)$  – токовый момент источника (в нашей модели зависимость  $p$  от частоты не учитывалась);  $v$  – комплексная постоянная распространения;  $P_v$  – полином Лежандра;  $\theta$  – угловое расстояние между наблюдателем и источником;  $\theta = R/a$ ,  $R$  – расстояние "источник – приемник" по поверхности Земли;  $a$  и  $b$  – размеры резонатора Земля – ионосфера,  $a$  – радиус Земли,  $b = a + h$ , где  $h$  – высота ионосферы.

Кроме того, были рассчитаны спектры волнового импеданса  $Z(\omega) = \frac{E_z(\omega)}{H(\omega)}$  для различных

дистанций "источник – приемник". Следует заметить, что волновой импеданс не зависит от токового момента источника, что повышает надежность определения дистанции.

Расчет спектров  $E_z$ ,  $H$  и  $Z$  для расстояний  $R$  от 500 до 19500 км с шагом через 500 км был выполнен с использованием методики ускорения сходимости рядов зональных гармоник [1]. Полученные в эксперименте спектры  $E_z^*$ ,  $H^*$  и  $Z^*$  сравнивались с наборами спектров  $E_z$ ,  $H$  и  $Z(\omega)$  и по максимальному совпадению находилась дистанция до источника всплеска – грозного разряда. Критерием совпадения являлся коэффициент взаимной корреляции  $K_R$  между экспериментальным и расчетным спектрами для дистанции  $R$  [4]. Его величина вычислялась по формуле

$$K_R = \frac{\sum_{k=1}^N x(\omega_k) x_d(\omega_k)}{\left[ \sum_{k=1}^N x^2(\omega_k) \sum_{k=1}^N x_d^2(\omega_k) \right]^{1/2}}. \quad (3)$$

Здесь

$$x(\omega_k) = S(\omega_k) - \bar{S}; \quad \bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(\omega_k);$$

$$x_d(\omega_k) = S_R(\omega_k) - \bar{S}_R; \quad \bar{S}_R = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_R(\omega_k);$$

$N$  – количество точек сравнения спектров

$N = \Delta F / \Delta f$ , где:  $\Delta F$  – частотный диапазон 36 Гц;  $\Delta f = 1/T$  – разрешение по частоте;  $T$  – длительность реализации, участвующей в обработке  $T = 1$  сек,  $\Delta f = 1$  Гц,  $N = 36$ .

В формуле (3)  $x(\omega_k)$  – центрированный экспериментальный спектр всплеска (для  $E_z^*$ ,  $H_x^*$  или  $Z^*$ );  $\bar{S}$  – среднее значение экспериментального спектра  $E_z^*$ ,  $H_x^*$  или  $Z^*(\omega)$ ;  $x_d(\omega_k)$  – центрированный расчетный спектр всплеска ( $E_z, H, Z$ ), полученный для пространственного разнеса источник – приемник, равного  $R$ ;  $\bar{S}_R$  – среднее значение расчетного спектра ( $E_z, H, Z$ ) для дистанции  $R$ .

#### 4. Определение направления на источник СНЧ всплеска

Пеленг источника определяется с помощью двух одинаковых магнитных антенн, которые ориентированы взаимноперпендикулярно:  $H_x$  соответствует в эксперименте направлению В-З,  $H_y$  – направлению С-Ю).

Идентичность магнитных датчиков и соответствующих усилителей проверялась с помощью искусственного источника магнитного поля. Он представлял собой соленоид, на который разряжался конденсатор, создавая импульс тока и магнитное поле вокруг соленоида. Источник перемещался по кругу вокруг приемных антенн, при этом контролировались входные сигналы, а также сравнивался расчетный пеленг с истинным.

Однако описанный метод проверки магнитных датчиков не исключает ошибки в фазах  $H_x$  и  $H_y$  на  $180^\circ$ , так как одновременное изменение знаков  $H_x$  и  $H_y$  не меняет расчетного пеленга, который, вообще говоря, имеет всегда два значения:  $\alpha$  и  $\alpha + 180^\circ$ . Для того, чтобы предотвратить возможную ошибку на  $180^\circ$  в фазах  $H_x$  и  $H_y$  и избавиться от неоднозначности  $\alpha$ , необходимо проводить калибровку магнитных датчиков по ориентации вектора Пойнтинга  $\vec{P}$  для источника с известным пеленгом.

В качестве калибровочного источника нами был выбран один из СНЧ всплесков, пеленг которого располагался вдоль линии С-Ю, а дальность, определенная по спектру импеданса, составляла  $\sim 5000$  км (на рис. 4 этот всплеск обозначен перечеркнутым квадратом). Из эксперимента следует, что этот источник находился на востоке Африки, вторая ложная точка соответствует Северному полюсу. Следова-

тельно, вектор  $\vec{P}$  должен быть ориентирован с юга на север, что и подтверждалось путем определения  $P_x = -E_z H_y$  и  $P_y = E_z H_x$ .

Вычисление  $P_x$  и  $P_y$  для всех всплесков, у которых удавалось определить дальность спектральным методом, производилось по первой полуволне СНЧ импульса, где превышение сигнала над шумом было максимальным. Обратное к  $\vec{P}$  направление однозначно соответствовало пеленгу источника.

#### 5. Результаты наблюдений

На рис. 1 приведен пример временной реализации естественного электромагнитного шума в полосе частот  $4 \div 40$  Гц, принятого на полигоне РИ НАНУ в с. Мартовая Харьковской области 2.08.99г. На рис. 1, а показана  $E_z$ -компонента, на рис. 1, б и рис. 1, в –  $H_x$  и  $H_y$  компоненты соответственно. Здесь приведен СНЧ всплеск длительностью  $\sim 0.5$  секунды, зарегистрированный в 8 ч 55 мин. 35 с. В обработке участвовал временной отрезок, равный 1 с, показанный на рис. 1, и поэтому разрешение по частоте, полученное для спектров всплеска составляет 1 Гц. На рис. 2 показаны гистограммы спектров мощности для

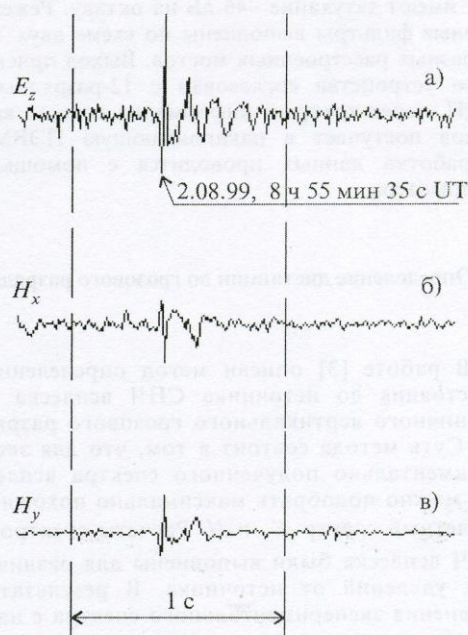


Рис. 1. Временные реализации СНЧ сигналов: а)  $E_z$ -компонент; б), в) ортогональные  $H_x$ - и  $H_y$ -компоненты

$E_z^*$  (рис. 2, а) и  $H^*$  (рис. 2, б). На этих же рис. 2, а и рис. 2, б сплошными линиями нанесены расчетные спектры  $E_z$  и  $H$  для дистанции "источник – приемник"  $6 \cdot 10^3$  км. Эти кривые максимально совпадают с гистограммами, полученными в эксперименте. На рис. 2, в приведены расчетная форма и экспериментальная гистограмма спектра импеданса всплеска  $Z(\omega)$ . Здесь в расчете также заложено расстояние

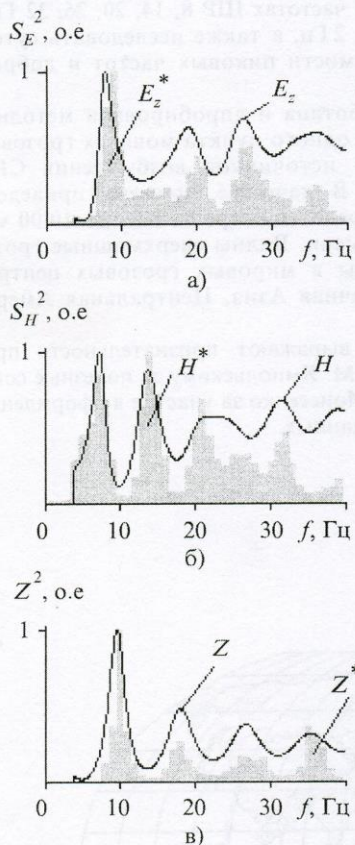


Рис. 2. Спектральные характеристики сигналов длительностью 1 с, указанные на Рис.1: а)  $E_z$ -компонента (гистограмма – эксперимент, плавная кривая – расчет); б)  $H$ -компонента (расчет и эксперимент); в) волновой импеданс (расчет и эксперимент)

$R=6 \cdot 10^3$  км. В процессе обработки сравнение расчетных спектров  $E_z$ ,  $H$  и  $Z$  (на рис. 2, а, б, в – плавная кривая) с тремя полученными в эксперименте гистограммами осуществлялось для всего набора дистанций от 500 до 19500 км (с шагом 500 км). Критерием совпадения служил коэффициент взаимной корреляции. На рис. 3, а показаны эти зависимости  $K_R=f(R)$  для спектров вертикального электрического поля, го-

ризонтального магнитного поля и волнового импеданса. Как видно из рис. 3, а максимум зависимости  $K_R=f(R)$  наблюдается во всех трех случаях для дистанции  $R=6 \cdot 10^3$  км. Таким образом, для приведенного примера, дистанция определена равной  $6 \cdot 10^3$  км.

Направление прихода определялось по ориентации вектора  $\vec{P}$ . Оно соответствует северо-западу от пункта наблюдения (рис. 3, б). По известным дистанции и направлению прихода, источник всплеска, приведенного на рис. 1 имеет координаты  $55^\circ$  с. ш.,  $59^\circ$  з. д. Это восточный район Канады.

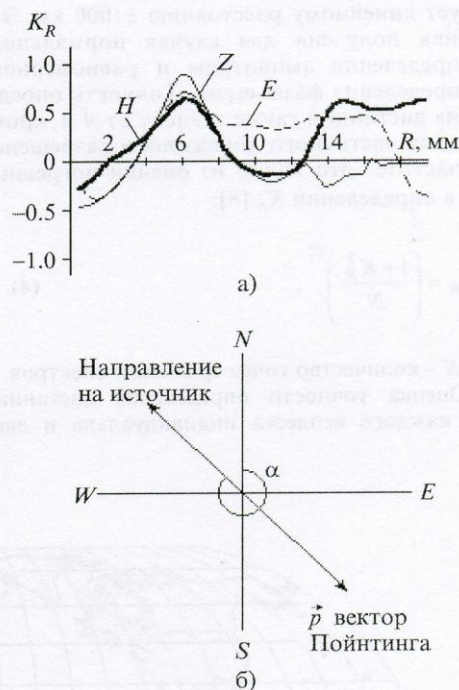


Рис. 3. а) Зависимость  $K_R = f(R)$  для  $E$ -,  $H$ - и  $Z$ -кривых; б) направление прихода СНЧ всплеска, определенное для реализации, приведенной на рис. 1

На рис. 4 приведено распределение по Земному шару источников СНЧ всплесков, которые были зарегистрированы на полигоне РИ НАН Украины 2.08.99 г. с 8.00 часов до 10.00 часов по мировому времени. Из всех принятых всплесков удавалось определить расстояние по  $E_z$ ,  $H$ ,  $Z$  для  $\sim 10\%$  случаев. Столь небольшой процент удачных для интерпретации всплесков вызван рядом обстоятельств. Во-первых, все расчеты были выполнены для одиночного вертикального источника. В природе одиночные мощные разряды довольно редки, максимум функции распределения числа разрядов в канале мол-

нии приходится на 3 разряда [6]. Это приводит к нарушению условия  $p(\omega)=const$ , т. е. к сильной изрезанности наблюдаемого спектра. Во вторых, спектры недостаточно мощных СНЧ всплесков могут быть существенно искажены СНЧ "фоном", который, как правило, сильно изрезан для временных интервалов  $\sim 1$  с. Точность нахождения координат определяется, в конечном итоге, отношением  $A=\text{сигнал/шум}$ . Понятие "сигнал" в нашем случае достаточно условно и может относиться к первым двум полуволнам СНЧ всплеска. Для  $A=20$  дБ, погрешность в определении пеленга составляет  $\approx \pm 6^\circ$ . Для дистанции  $\approx 10000$  км эта погрешность соответствует линейному расстоянию  $\pm 1000$  км. Эта оценка получена для случая нормального распределения амплитуды и равномерного распределения фазы шума. Точность определения дистанции также зависит от  $A$  и, кроме того, от частотного диапазона и разрешения по частоте. Это видно из оценки погрешности в определении  $K_R$  [8]:

$$\Delta K_R = \left( \frac{1 + K_R^2}{N} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество точек сравнения спектров.

Оценка точности определения дистанции для каждого всплеска индивидуальна и дает

значение в среднем не лучше 1000 км. Таким образом, точность локации в СНЧ диапазоне не очень велика.

В заключение сформулируем основные выводы.

1. Разработан и изготовлен аппаратный СНЧ комплекс, который размещен на измерительном полигоне РИ НАНУ в Харьковской области ( $50^\circ$  с. ш.,  $37^\circ$  в. д.). На полигоне имеется возможность проводить круглосуточные измерения как во всей полосе частот ( $4\text{--}40$  Гц), так и на пиковых частотах ШР 8, 14, 20, 26, 32 Гц в полосах  $\pm 1, 2$  Гц, а также исследовать суточные зависимости пиковых частот и добротностей ШР.

2. Отработана и апробирована методика локации из одного пункта мощных грозовых разрядов – источников возбуждения СНЧ всплесков. В качестве примера приведена карта распределения гроз с 8.00 до 10.00 мирового времени. Видны сверхмощные грозовые разряды в мировых грозовых центрах (Юго-Восточная Азия, Центральная Америка).

Авторы выражают признательность профессору Ю. М. Ямпольскому за полезные советы и Л. Н. Моисеенко за участие в оформлении первичных данных.



Рис.4. Распределение по Земному шару источников всплесков, принятых в Харькове