



И. ВАСИЛЬЕВ, Т. С. ИМАНОВ, И. Д. КОЗИН,  
И. Н. ФЕДУЛИНА, Ж. М. БЕКМАГАМБЕТОВА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛНИЙ И ГРОЗОВЫХ ФРОНТОВ

Представлена методология регистрации мощности и пространственно-временных характеристик молниевых разрядов, скорости и направления перемещения грозовых фронтов.

-~~ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ГРОЗЫ В РАЙОНЕ АЛМАТЫ~~

Исследования характеристик молниевых разрядов имеют большое теоретическое и практическое значение. В научном плане наиболее интересны вопросы образования различных типов молний, в практическом плане – роль грозовых разрядов в возникновении лесных пожаров, пробоев линий электропередач и др.

На земном шаре одновременно “громит” ( $1000 \div 2000$ ) гроз [1, 2]. Это значит, что одновременно в атмосфере находится около ( $1000 \div 2000$ ) электрически активных грозовых облаков. Из наблюдений известно, что среднее время электрической активности одного грозового облака ~ ( $20 \div 30$ ) минут [3]. С учетом этих данных общее количество грозовых облаков, образуемых за сутки, равно ~  $10^5$ .

Однако при одновременном изучении молниевого разряда – токовая (dd - kA) – временная – от 10 до 100 мс – пространственная – зонд (около 1 км) – амплитудная – 100–200 кВ и выше – энергетическая – 10–100 МДж – это то что то же самое. Поэтому можно сказать, что молния – это грозовой фронт, который передвигается со скоростью звука (~340 м/с) и имеет длину ~100 м. Время жизни молнии – это время, в течение которого она существует. Это время может быть различным для разных молний, но в среднем оно составляет ~10–20 мс. Мощность молнии – это количество энергии, выданной молнией за время ее существования. Мощность молнии зависит от ее длины, диаметра канала и тока. Для молний, зарегистрированных в нашей стране, характерно то, что их мощность составляет ~10–100 МДж. Это означает, что молниевые разряды являются одними из самых мощных природных явлений на Земле.

Из всего разнообразия молниевых разрядов, а их насчитывается более 70, выберем разряды, происходящие внутри облака, между облаками, между облаком и землей, а также между облаком и ионосферой (спрайты), которые различаются направлением, мощностью, длительностью и протяженностью (см. рис. 1).

Параметры обычных линейных молний между облаком и землей следующие: а) длина – не более 10 км, б) диаметр канала – до 40 см, в) сила тока –  $10^5 \div 10^6$  А, г) длительность одной молнии 0,1 – 0,6 с, д) общее число молний, проходящих в одном канале ≤ 50;

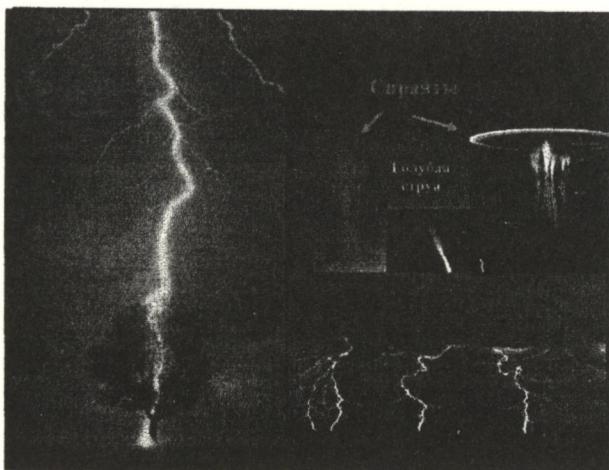


Рис. 1. Типы грозовых разрядов.

Внутриоблачные разряды имеют длительность 20–150 мкс, межоблачные – более 150 мкс.

Спрайты преимущественно красного цвета, наиболее яркая часть – голова (66–74 км), выше – тонкие светящиеся линии – волосы. Под головой – темная полоска – воротник (ожерелье), ниже – усы, которые простираются до 40–50 км и меняют цвет от красного, до – голубого (внизу). Спрайты бывают одиночные, однако чаще бывают двойные и тройные. В поперечнике они достигают 40 км. Время жизни спрайтов порядка нескольких миллисекунд [4], хотя наблюдаются и более коротковременные разряды. Здесь же присутствуют голубые струи.

Для исследования характеристик молниевых разрядов предлагается использовать метод пассивной пеленгации, который может быть использован в авиации, геологии, противопожарной службе, топливно-энергетическом комплексе.

Метод позволит решать следующие задачи:

- определение момента возникновения молниевого разряда в системе единого времени;
- определение координат молниевых разрядов;
- идентификация типа молниевого разряда: облако – земля, земля – облако, облако – облако, внутри облака;
- оценка напряженности поля в источнике молниевого разряда;
- выделение грозовых ячеек и очагов;
- документирование и передача потребителю информации о координатах, времени и параметрах молниевых разрядов, грозовых ячеек и очагов, а также о направлении и скорости движения грозовых фронтов.

## Описание метода и принципов его реализации.

Молниевые разряды грозовых облаков излучают электромагнитную энергию в широком диапазоне радиочастот и в пространстве распределены, как правило, в виде дугообразных фронтов. Наблюдения за грозовыми облаками проводятся во всех частотных диапазонах электромагнитных волн, начиная от ультракоротких частот (УНЧ) с полосой (3÷30) Гц и кончая диапазоном рентгеновских и  $\gamma$ -излучений.

1. Для определения удаления грозовых фронтов используем прием сигналов в двух частотных диапазонах и распространяющихся различными модами вдоль земной поверхности или путем отражения от ионосферных слоев атмосферы. Используется система трех ортогонально ориентированных рамочных антенн. Схема входного антенного устройства приведена на рис. 2.

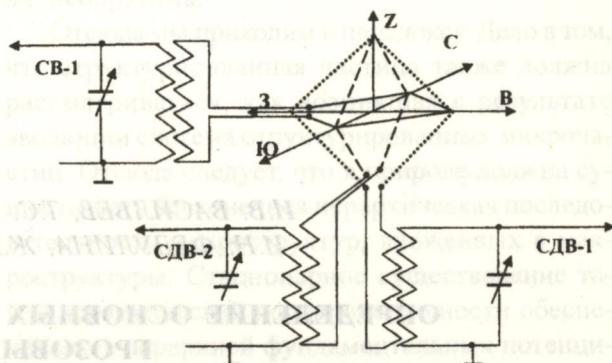


Рис. 2. Схема входного антенного устройства.

Земная волна принимается на две вертикальные и взаимно перпендикулярные рамочные антенны, плоскости которых ориентированы в направлениях север-юг и восток-запад. Каждый из сигналов оцифровывается с максимально возможной частотой. По числу непрерывных значений амплитуды сигнала определяется его наклонная длительность. По отношению амплитуд сигналов СДВ-1/СДВ-2=tg  $\alpha$  в каждой антенне определяется азимутальное направление на грозовой фронт. Угол  $\alpha$  отсчитывается от направления на восток. Диаграммы направленности используемых антенн таковы, что в вертикально ориентированных антенах максимально затухают ионосферные сигналы, а в горизонтальной антенне – сигналы, распространяющиеся вдоль земной поверхности. Соотношения длительности сиг-

налов в трех антенах позволяет рассчитать вектор разряда, то есть его истинное направление и пространственные размеры.

Для определения дальности до источника грозового разряда  $d$  используется измеряемая разность времени  $\Delta t$  появления поверхностного СДВ-1 и ионосферного СВ-1 сигналов для чего применимы методы взаимной корреляции или кепстральный анализ оцифрованного суммарного сигнала [5, 6].

Особый вопрос возникает при выборе рабочей частоты ионосферного сигнала. Коротковолновые сигналы удобны в том, что имеют значительную высоту отражения от ионосферы, что обеспечивает существенную разность времени распространения различных мод, но сама высота отражения также значительно меняется. Если в дневное время суток эта высота оценивается в 200 км, то в ночные часы суток она может подниматься выше 600 км.

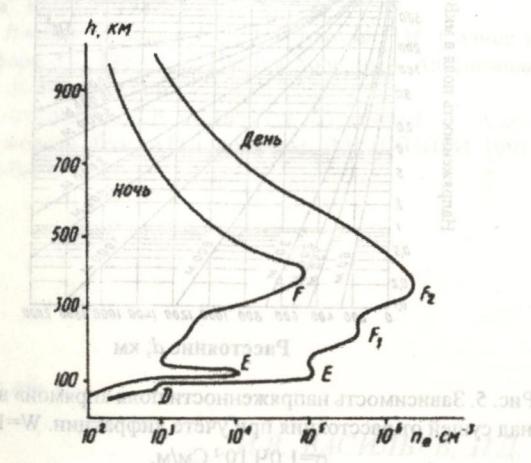


Рис. 3. Полученные и ночные высотные профили электронной концентрации среднеширотной ионосферы.

Средние волны также имеют изменения высоты отражения. Рассматривая суточные вариации профиля электронной концентрации, представленные на рис. 3 [7], можно отметить, что на частотах порядка 1 МГц и ниже эти высотные изменения высоты отражения незначительны. Выбор истинных частот, удобных для предложенных измерений, следует осуществить экспериментально.

Удаление грозового фронта  $d$  определяется модельными расчетами распространения сигналов различными модами с использованием модели нижней ионосферы [8].

Скорость грозового фронта определяется по изменению его удаления в двух последовательных измерениях с учетом азимутального угла  $\alpha$  и направления движения.

2. С целью прогноза ожидаемых последствий молниевых разрядов необходимо при регистрации молниевых разрядов оценивать их мощность.

Оценка мощности молниевого разряда производится по амплитуде СДВ-сигнала, распространяющегося вдоль земной поверхности.

Зная коэффициент усиления приемного тракта (используем операционный усилитель), оцениваем напряжение, подаваемое с антенны на вход приемника  $U_{\text{вх}}$ . Через значение действующей высоты антенны  $h_0$  рассчитываем напряженность поля  $E_{\text{вх}}$  в точке приема

$$E_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / h_0.$$

Полагая удаление молниевого разряда известным  $d$ , можно рассчитать его мощность. Для этого обратимся к теории распространения радиоволн вдоль земной поверхности.

Основополагающим методом определения функции ослабления в зависимости от расстояния от источника является метод расчета по ряду В.А. Фока [9]:

$$V(x, y, q) = W_0(x, y, q) = \sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{iqx_s}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y)}{w(t_s)},$$

где (1)

$$x = \frac{d}{R_s} \left( \frac{kR_s}{2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad y = \left( \frac{2}{kR_s} \right)^{\frac{1}{3}} kh, \quad q = i\delta \left( \frac{kR_s}{2} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$R_s$  – радиус Земли;  
 $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;

$\lambda$  – длина волны;  
 $d$  – расстояние от источника до точки приема, отсчитываемое вдоль поверхности Земли;

$\delta$  – приведенный поверхностный импеданс;  
 $h$  – высота приема сигнала над поверхностью Земли.

В настоящее время наиболее распространенным методом расчета функции ослабления над геометрически и электрически неоднородными трассами является метод численного решения интегрального уравнения Хаффорда [10]:

$$W(d) = 1 + i\sqrt{\frac{ikd}{2\pi}} \int_0^d W(x) \left[ \delta(x) + (1 - \frac{1}{ikr_2}) \frac{\partial r_2}{\partial n} \right] \exp[ik(r_1 + r_2 - r_0)] dx \frac{\cos \psi \sqrt{x(d-x)}}{\cos \psi \sqrt{x(d-x)}} \quad (2)$$

Здесь  $\psi$  - угол между нормалью к поверхности  $n$  и радиальной составляющей.

Для расчета функции ослабления над кусочно-однородными в электрическом отношении трассами используется интегральное уравнение Фейнберга:

$$W(d) = W_0(d) + i \sqrt{\frac{ikd}{2\pi}} \int_0^d [\delta - \delta_0] \frac{W(x)W_0(d-x)}{\sqrt{x(d-x)}} dx \quad (3)$$

В выражении (3) функция  $W_0(d)$  рассчитывается по формуле Фока (1) с импедансом  $\delta_0$ , который выбирается произвольно.

Модуль вертикальной составляющей электрического поля  $|E_B|$  связан с модулем функции ослабления  $|W|$  формулой [11]:

$$|E_B|_{(AB/M)} = \frac{300\sqrt{P}}{d} |W(d)| - \frac{1}{ikd} + \frac{1}{(ikd)^2}, \text{ где } \quad (4)$$

$P$  – излучаемая мощность, кВт;  $\frac{1}{ikd}$  – индукционный,  $\frac{1}{(ikd)^2}$  – статический члены, которые «участвуют» в формировании поля в ближней зоне излучателя. Исключая малые индукционный и статический члены уравнения (4) получаем

$$|E_B|_{(AB/M)} = \frac{300\sqrt{P}}{d} |W(d)|. \quad (5)$$

Модуль функции ослабления дифрагирующего вдоль земной поверхности радиосигнала является функцией диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и проводимости  $\sigma$  подстилающей поверхности. Пространственные распределения напряженности поля электромагнитных волн для различных значений  $\epsilon$  и  $\sigma$  рассчитаны численными методами [12] рекомендованы Регламентом связи [13] для практических расчетов.

Ниже приведены рекомендуемые значения  $\epsilon$  и  $\sigma$  для различных типов подстилающей поверхности.

Таблица 1. Проводимости почв

Поверхность почв	$\sigma$ , См/м
Сухой песок	$2 \cdot 10^{-4}$
Песок	$2 \cdot 10^{-3}$
Средневлажная	$2 \cdot 10^{-3}$
Влажная земля	$2 \cdot 10^{-2}$
Пресная вода	$2 \cdot 10^{-3}$
Морская вода	4

Исследования, проведенные на территории Республики Казахстан [14], дают следующие характеристики проводимости  $\sigma$ .

Таблица 2. Проводимости почв в регионах Казахстана

Области Казахстана	Проводимости почв $\sigma$ , См/м	
	рекомендованные	экспериментальные
Актюбинская	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Уральская	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Восточно-Казахстанская	$10^{-2}$	$10^{-2}$
Алматинская	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
Жамбылская	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
Карагандинская	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
Шымкентская	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$

Таким образом казахстанские почвы ближе всего схожи с влажной почвой, что объясняется неглубоким залеганием подземных вод [15].

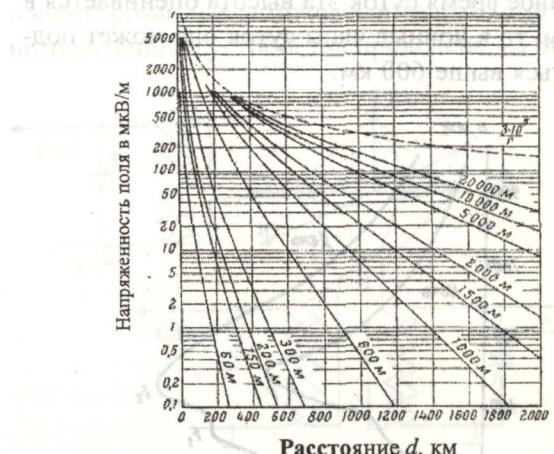


Рис. 5. Зависимость напряженности поля «прямой» волны над сушей от расстояния при учете дифракции.  $W=1$  кВт,  $\sigma=1,04 \cdot 10^{-2}$  См/м.

Не будет существенной ошибкой, если для расчетов мощности излучения молниями мы примем для всей территории Казахстана проводимость  $\sigma$ , равную  $10^{-2}$  См/м. Для такой проводимости пространственное распределение напряженности поля электромагнитных волн представляется графиком на рис. 5.

Теперь для используемой длины радиоволны  $\lambda$  и вычисленного удаления грозового фронта  $d$  по графику на рис. 5 и уравнению (5) определяем напряженность поля в точке излучения и мощность источника электромагнитного излучения  $P$ .

Таким образом, представленные теоретические и технические методы дают возможность определить истинное направление молниевого разряда, его длительность, которые, в свою оче-

редь, дают информацию о типе молнии. Определяемое направление и скорость движения грозовых фронтов позволит прогнозировать возможные неприятные последствия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gish O.H. and Wait G.R. Thunderstorms and Earth's General Electrification. //Journal of Geophysical Research, 1950, v. 55, № 4, 473-484.

2. Stergis C.G., Rein G.C. and Kangas T. Electric field measurements above thunderstorms. //Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1957, v. 11, p.83-90.

3. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодоров В.В., Хворостыянов В.И. Облака и климат. Л.: Гидрометеоиздат, 1986, 512 с.

4. Raingen R.L., Mende S.B. Time resolved sprite imagery / / Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 3465-3468.

5. Афраймович Э. Л., Козин И.Д., Рубинштейн Б. М. Измерение относительного запаздывания в нижней ионосфере амплитудно-модулированного сигнала. //Препринт №14-81 СибИзмир, Иркутск, 1981.

6. Афраймович Э.Л., Жумабаев Б. Т., Козин И.Д., Рубинштейн Б.М. Спектральный анализ смещенной квадратурной компоненты комплексного радиосигнала ДВ-диапазона. / / "Наука" КазССР, 1982.

7. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М Солнце и ионосфера, М., 1969. Г.С. Иванов-Холодный. Автономная работа .Ионосфера.htm.

8. Дрибинская Л.В., Козин И.Д., Туркеева Б.А. Адаптивная модель области D ионосферы. //М.: ВИНТИ, 1991, №2268-В-91.

9. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространение электромагнитных волн. - М.: Советское радио, 1970, - 519 с.

10. Huford G.A. An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface. // Quart. Appl. Math., 1952, v.9, - pp. 391-404.

11. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. // - М.: Изд-во АН СССР, 1961, -546с., 2-е издание, М.: изд-во Наука. Физматлит, 1999, - 496 с.

12. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн 1972.

13. Регламент радиосвязи. Женева, Международный союз электросвязи, т.2, 1990.

14. Дрибинская Л., Козин И.Д. Оптимизация радиовещания в диапазонах ДВ- и СВ- на территории Казахстана. // Электросвязь, М.: 1990, №6.

15. Дрибинская Л., Козин И.Д. Способ определения геохимических свойств грунтовых вод. //XVIII Межведомственный семинар по распространению километровых и более длинных радиоволн, Улан-Уде, 1993.

## Резюме

Найзайтай разрядтарының, жылдамдығының және найзайфалы шекаралардың ығысу бағытының күшкүатын және кеңістік-уақыттық көрсеткіштерін тіркеу әдістемесі ұсынылған.

## Summary

The methodology of registration of capacity and existential characteristics lightning's categories is presented, to speed and directions of moving of storm fronts.

ДГП «Институт ионосферы».

г. Алматы

Поступила 22 июля 2007 г.