

## Пространственные характеристики излучения разрядов молнии

© В.К. Балханов,<sup>1</sup> Ю.Б. Башкуев,<sup>1</sup> В.И. Козлов,<sup>2</sup> В.А. Муллаяров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Россия  
e-mail: ballar@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
677980 Якутск, Россия  
e-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru

(Поступило в Редакцию 21 апреля 2008 г.)

Представлены результаты измерения уровней электрического и магнитного полей излучения разрядов молнии. Разряды молнии происходили на участке земной поверхности, ограниченной сектором  $\sim 90^\circ$  и радиусом  $\sim 30\text{--}300$  km. Установлена пространственная степенная зависимость компонент электромагнитного поля излучения разрядов молнии. Результаты измерения интерпретированы методами фрактальной геометрии.

PACS: 41.20.Jb, 47.53.+n

### Введение

В один из дней июля 2007 г. в течение 1 часа с 15<sup>00</sup> по 16<sup>00</sup> LT было зарегистрировано 34 разряда молнии. Все разряды происходили из сектора раствором  $\sim 90^\circ$  и ограниченного радиусом  $\sim 30 \div 300$  km между г. Улан-Удэ и оз. Байкал.

Результаты измерений представлены на рис. 1. Там же показаны линейные аппроксимации, удовлетворительно описывающие экспериментальные точки. В результате измерения установлены следующие пространственные характеристики излучения разрядов молнии:

$$E \sim 1/R^{1.5}, \quad H \sim 1/R^{1.27}. \quad (1)$$

Здесь  $E$  — вертикальная электрическая,  $H$  — горизонтальная магнитная компоненты электромагнитного поля,  $R$  — расстояние от разряда молнии до пункта измерения.

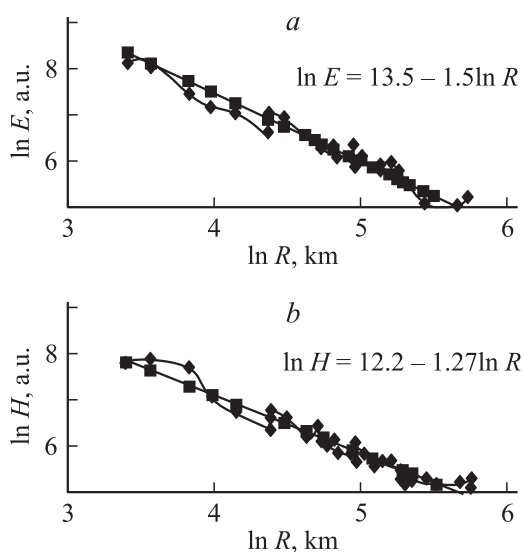


Рис. 1. Результаты измерений и их линейная регрессия.

В настоящей статье сначала опишем измерительное устройство. Затем предложим модель, которая позволяет установить степенные закономерности между физическими и геометрическими величинами, тем самым, теоретически опишем закономерности (1).

### Прием широкополосного излучения

Нами использовалось устройство для регистрации излучения разрядов молнии, в которой одновременно измеряются две ортогональные горизонтальные компоненты магнитного поля и вертикальная компонента электрического поля [1]. Это устройство позволяет измерить амплитуду полей и направление на источник. В принятом излучении от удаленного разряда молнии обычно имеются два последовательно идущих импульса, связанных с прямой волной и волной, отраженной от ионосферы. Устройство регистрирует оба импульса и это позволяет по разности их прихода во времени определять расстояние до источника.

На рис. 2 показан типичный широкополосный сигнал от разряда молнии. Отмечено  $\Delta t$  — разность времени прихода обоих импульсов и маркер —  $1000 \mu\text{s}$ .

На рис. 3 показаны оба канала распространения, по которым электромагнитные импульсы от разряда молнии приходят к измерительному устройству. Здесь  $h$  — высота рельефа. Поскольку высота ионосферы  $h$  известна, то  $R$  можно найти из следующего выражения:

$$R = \frac{4h^2 - c^2 \Delta t^2}{2c \Delta t}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света. Нами учитываются высота подъема разряда молнии и кривизна поверхности Земли. Их учет привел бы только к несущественным поправкам к измеряемым величинам.

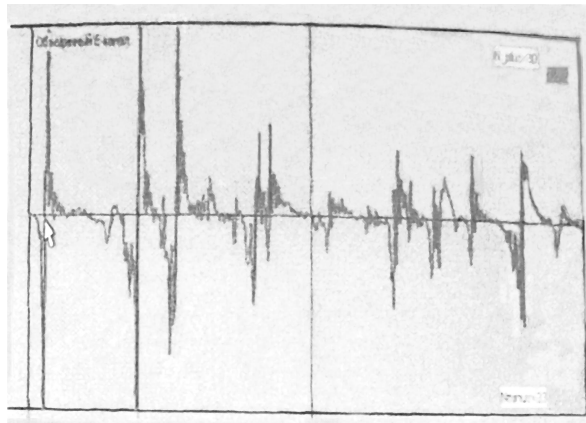
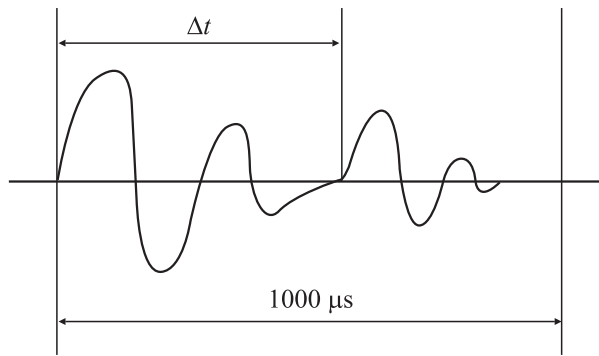


Рис. 2. Широкополосный сигнал от разряда молнии (рядом — кадр с монитора компьютера).

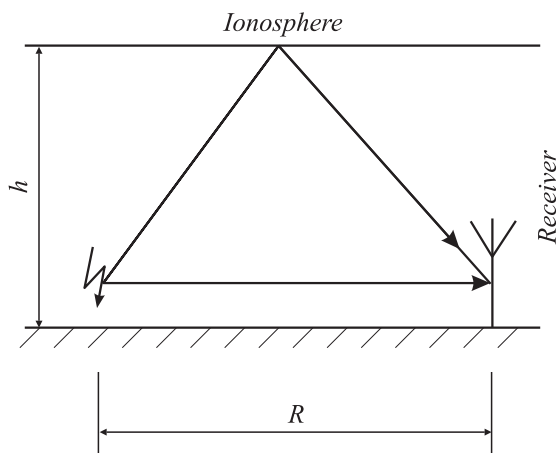


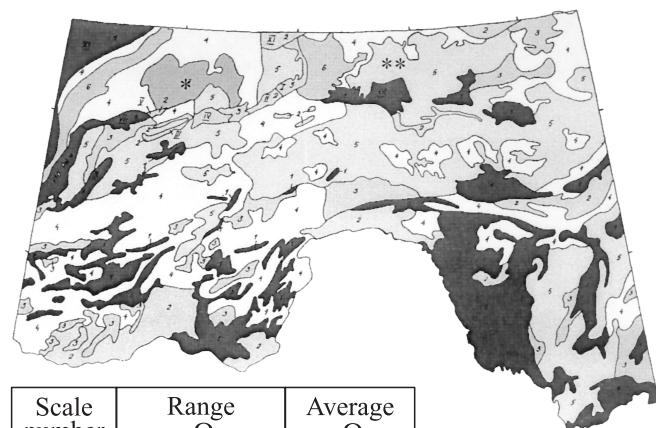
Рис. 3. Геометрия каналов распространения разряда молнии.

### Распределение проводимости на поверхности Земли

Природные объекты на поверхности Земли в большинстве случаев представляют собой фрактальные образования [2]. Качественно определить, является ли объект

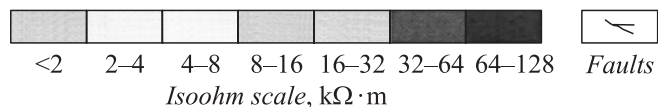
фрактальным, можно, рассмотрев его при различных увеличениях. У фрактальных объектов отсутствует естественный масштаб длины, и при различных значениях увеличения они выглядят одинаково [3,4]. Инструментом исследования электрических свойств природных объектов являются внешние электромагнитные поля различной частоты. Каждый участок поверхности на различных частотах имеет свою проводимость. Однако фрактальность объектов означает, что в статистическом смысле на различных частотах границы каждого проводящего участка подобны границе любого другого участка.

Описанная картина самоподобия границ проводящих участков на различных частотах хорошо видна на рис. 4–6 карт проводимости [5]. Таким образом, электропроводность земной коры распределена по поверхности Земли самоподобным образом.



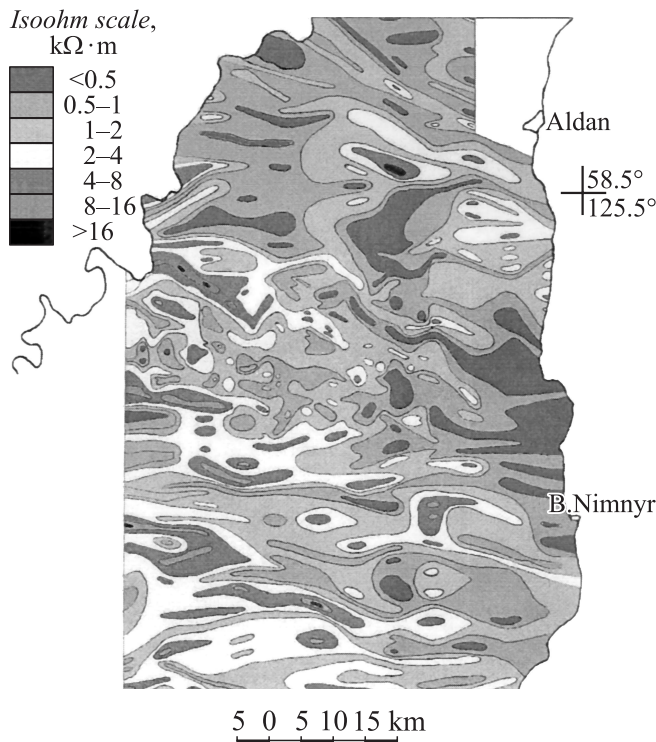
Scale number	Range $\rho_{\sim}, \Omega \cdot m$	Average $\rho_{\sim}, \Omega \cdot m$
1	$\leq 500$	250
2	500–1000	750
3	1000–2000	1500
4	2000–4000	3000
5	4000–8000	6000
6	8000–16 000	12 000
7	$> 16 000$	

Рис. 4. Карта эффективного сопротивления юга Сибири и Дальнего Востока на частоте 40 Hz.



10 0 10 30 50 km

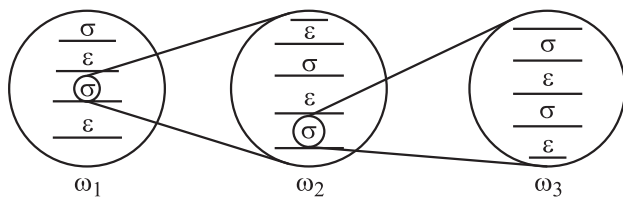
Рис. 5. Участок карты эффективного сопротивления юга Сибири и Дальнего Востока (отмечен звездочкой на рис. 4) на частоте 80 Hz.



**Рис. 6.** Фрагмент карты эффективного сопротивления Южной Якутии (участок Алдан—Б. Нимныр) (отмечен двумя звездочками на рис. 4) на частоте 22.3 kHz.

## Пространственные характеристики электрических параметров

Фрактальное распределение проводимости должно сказаться и на законах распространения электромагнитных волн. Электрические свойства природных объектов описываются проводимостью  $\sigma$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  (магнитные свойства нами не рассматриваются). Влияние неоднородного распределения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  на внешнее электромагнитное поле часто моделируют однородными слоями, в которых значения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  постоянны. Фрактальное распределение  $\sigma$  и  $\varepsilon$  также можно моделировать однородными слоями, причем каждый слой обладает только либо проводящими, либо диэлектрическими свойствами. На каждой частоте внешнего поля каждый слой подобен другим слоям



**Рис. 7.** Фрактальное распределение электрических параметров неоднородной среды. Под разным увеличением, т.е. на разных частотах, каждый слой подобен любому другому слою:  $\omega$  — круговая частота.

со своим распределением электрических параметров (рис. 7).

Простейшая модель, в рамках которой распределение проводящих участков связано с фрактальной геометрией, основана на канторовском множестве. Эта модель позволяет ввести фрактальную размерность  $D$  как величину, описывающую самоподобие проводящих участков, причем для канторовского множества  $D < 1$ .

Электромагнитные процессы в веществе описываются материальными уравнениями Максвелла. Выпишем необходимое нам уравнение:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mu_0 \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (3)$$

Здесь  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Самоподобие распределения проводимости должно приводить к тому, что уравнения Максвелла будут инвариантными относительно законов геометрического подобия [6]:

$$R' = \eta R, \quad t' = \eta^{1/D} t, \quad (4)$$

где  $\eta$  — масштабный множитель. Обоснование того, что величина  $D$  в степенном показателе (4) является фрактальной размерностью, дано в [7].

Неизменность свойств объектов во всех масштабах приводит к тому, что физические и геометрические величины выражаются друг через друга степенным образом. Аналогично (4), предположим, что законам подобия удовлетворяют компоненты электромагнитного поля:

$$E' = \eta^{-\Delta} E, \quad H' = \eta^a H. \quad (5)$$

Параметр  $\mu_0$  при этом не меняется, его изменение приведет только к переопределению единиц измерения. Подставив (4) и (5) в уравнения (3), и считая уравнения Максвелла инвариантными, найдем законы подобия для компонент  $E$  и  $H$ :

$$E' = \eta^{-\Delta} E, \quad H' = \eta^{-1-\Delta+1/D} H. \quad (6)$$

Другие закономерности были приведены в [7,8]. Исключив масштабный множитель  $\eta$  следующим приемом:

$$\eta = \frac{R'}{R} = \left( \frac{E'}{E} \right)^{-1/\Delta},$$

найдем пространственную характеристику электрического поля:

$$E \sim 1/R^\Delta. \quad (7)$$

Аналогичным образом находим

$$H \sim 1/R^{1+\Delta-1/D}. \quad (8)$$

С помощью формул (7) и (8) решена задача теоретического обоснования экспериментальных результатов (1). Здесь  $D$  является фрактальной размерностью канторовского множества, описывающего распределение проводимости на поверхности Земли.

Для физического смысла показателя  $\Delta$  можно предложить следующее объяснение. Электрическое поле точечного излучателя в свободном пространстве удовлетворяет закономерности  $E \sim 1/R^2$ . Поле бесконечного по длине линейного излучателя описывается зависимостью  $E \sim 1/R$ . Очевидно, что для излучателя, ограниченного по длине и зигзагообразного по форме, степенной показатель  $\Delta$  должен быть заключен в пределах от единицы до двух.

Сравнив (7) и (8) с (1), находим:  $\Delta = 1.5$  и  $D = 0.82$ . Полученные значения удовлетворяют тому, что  $1 < \Delta < 2$  и  $D < 1$ .

## Заключение

В результате измерений установлена степенная пространственная характеристика электромагнитного поля молниевых разрядов, распространяющегося вдоль неоднородной по электрическим параметрам земной поверхности. Разряды молнии происходили на участке земной поверхности, ограниченной спектром  $\sim 90^\circ$  с радиусом  $\sim 30 \div 300$  km. Теоретическое описание экспериментально полученных закономерностей проведено следующим образом. Участки со своими значениями проводимости распределены по поверхности Земли самоподобным образом, т.е. на разных частотах участки статистически подобны друг другу. Это обстоятельство позволяет применить законы подобия к уравнениям Максвелла, считая последние инвариантными относительно этих законов.

В результате были теоретически установлены степенные пространственные характеристики компонент электромагнитного поля. При этом степенные показатели выражаются через два параметра  $\Delta$  и  $D$ . Один из них ( $\Delta$ ) характеризует степень извилистости излучателя — разряда молнии, другая величина ( $D$ ) описывает фрактальную размерность распределения проводящих участков на поверхности Земли. Для данного участка земной поверхности (г. Улан-Удэ—оз. Байкал) установлено, что  $\Delta = 1.5$  и  $D = 0.82$ .

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 08-01-98006, 08-02-98007.

## Список литературы

- [1] Козлов В.И., Муллаяров В.А. Грозовая активность в Якутии. Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2003. 97 с.
- [2] Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 262 с.
- [3] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
- [4] Нигматуллин Р.Р., Потапов А.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 3. С. 30–49.

- [5] Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства криолитозоны Востока России в радиодиапазоне. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 258 с.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1973. 208 с.
- [7] Балханов В.К., Башкуев Ю.Б. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. № 6. С. 39–45.
- [8] Балханов В.К., Башкуев Ю.Б. // Сб. тр. 6-го Междунар. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. СПб., 2005. С. 265–268.