

DOI: 10.18454/2079-6641-2016-14-3-91-97

УДК 550.837.214

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ЛИТОСФЕРОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В. Н. Уваров

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Россия, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная 7

E-mail: uvarovvnnng@yandex.ru

Рассматриваются физические условия возникновения и распространения излучения литосферного происхождения, основанные на них особенности регистрации. Предложены методы измерения сейсмoeлектромагнитной активности, параметры и процедуры их измерения

Ключевые слова: сейсмoeлектромагнетизм, электромагнитная эмиссия литосферы, тектонические напряжения

© Уваров В. Н., 2016

MSC 18A32

METHODS OF ISOLATION OF ELECTROMAGNETIC LITOSPHERIC SIGNALS

V. N. Uvarov

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034,
Kamchatskiy kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

E-mail: uvarovvnnng@yandex.ru

The physical terms of origin and distribution of electromagnetic radiation of lithospheric origin and features of registration based on them are examined. Measuring methods offer seismoelectromagnetic activity is parameters and procedures of their measuring

Key words: seismoelectromagnetism, electromagnetic emission of lithosphere, tectonical tensions

© Uvarov V. N., 2016

Введение

Литосфера—хрупко-пластичная крайне неоднородная среда как по минерально-петрографическому составу, так и по механическим и электрофизическим свойствам. При распространении поля напряжения вдоль поверхности происходит его релаксация, сопровождающаяся физико-химическими изменениям породы (растрескивание, размалывание в постоянно действующих плоскостях смещения, разломах) и относительным перемещениям блоков породы. Поскольку основными формообразующими силами твердого тела, в частности горной породы, являются силы электромагнитного взаимодействия, всякое изменение формы и структуры отдельных фрагментов

Распространение литосферного излучения

Естественное электромагнитное поле над поверхностью Земли является смесью полей различного происхождения. Его доминирующая компонента связана с атмосферно-грозовой активностью в азиатском, африканском и американском центрах мировой грозовой активности, где ежесекундно происходит 100 – 300 молниевых разрядов. Максимальная напряженность поля в точке наблюдения может достигать единиц в/м, превышая фоновое значение в сотни тысяч раз [1]. Излучение грозового происхождения распространяется преимущественно в волноводе между земной поверхностью и ионосферой, где потери составляют от долей до первых единиц децибела на километр [2]. Поэтому для волн СНЧ-ОНЧ диапазона при наблюдении в средних широтах источники мировых центров гроз находятся в дальней волновой зоне. Компонента магнитосферного происхождения особенно сильно проявляет себя во время магнитных бурь. Электромагнитное излучение, связанное с технической деятельностью человека существенно в местах с высокой плотностью населения и вблизи ЛЭП. В настоящее время естественное электромагнитное излучение СНЧ-ОНЧ диапазона используется в глобальном дистанционном зондировании, проводимом рядом международных геофизических проектов (TOGA, WWLLN, AWDANET), результаты которых открыты на соответствующих сайтах. Однако использование этих данных для исследования литосферного излучения представляется проблематичным.

Литосферная компонента существенна в районах повышенной сейсмической активности в периоды активизации. Основная информация о деформационных процессах в коре из-за поглощения высокочастотного излучения проводящей породой переносится низкочастотным излучением СНЧ-ОНЧ диапазона. При наблюдении удаленных литосферных источников путь распространения излучения состоит из двух частей: от подземного источника до поверхности и распространение в атмосфере от места выхода до регистратора. Оценки угла конуса выхода электромагнитного излучения для типичных параметров литосферы для этого диапазона волн лежит в диапазоне $10^0 \div 20^0$ около вертикали. Поэтому пятно выхода излучения на поверхности достаточно точно указывает на положение проекции источника. Поскольку потери электромагнитного излучения при распространении в земной коре составляют десятки дБ/м, доступными для регистрации оказываются сигналы литосферных источников, расстояние до которых значительно меньше длины волны. Их расположение относится к ближней волновой зоне.

Отсюда следует, что в масштабах источников литосферного происхождения поле грозового происхождения однородно, в то время как поле литосферного происхожде-

ния неоднородно. Это основное различие статистических характеристик полей может быть положено в основу метода разделения сигналов, переносимых этими полями.

Разделение сигналов

Возможны несколько путей выделения сигнала ЭМИЛ из фона помех. Выделение по параметрам: частоте, амплитуде или поляризации. К сожалению необходимые для выделения сигналов ЭМИЛ отличительные признаки не найдены. Физическое ограничение (экранирование) объема области, занимаемой источником излучения и регистратором, реализуется при измерениях в полостях литосферы, например, в шахтах, рудниках или скважинах. Этот подход (использование рудников или шахт) хорошо известно [3] и потому рассматриваться не будет.

Гораздо эффективным является компенсация помехового сигнала, на рассмотрении которого остановимся подробнее. Такой подход может быть реализован в двух вариантах — при скалярной и векторной аппроксимации поля.

1. При скалярной аппроксимации поля (регистрации одного параметра поля) компенсация основана на использовании различий пространственных статистических характеристик полезного и шумового сигналов.

2. При векторной аппроксимации используется линейная зависимость между различными компонентами электромагнитного поля. Такой подход использован в магнитотеллурическом и магнитовариационном методах.

Скалярная аппроксимация поля

Зависимость амплитуды дипольного излучения от расстояния до источника при распространении в свободном пространстве имеет вид

$$A = A^0 \frac{\exp(-ifr/a)}{r} \left(\left(\frac{a}{fr} \right)^2 + i \frac{a}{fr} - 1 \right) \sin(\theta) \quad (1)$$

здесь $a = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \approx 5 \cdot 10^9$ м/с — константа

c, ϵ, μ — скорость света, электрическая и магнитная восприимчивость среды,

A^0 — параметр, зависящий от дипольного момента, параметров среды и частоты излучения,

θ — угол между направлением распространения излучения и дипольным моментом,

f, r — соответственно частота и расстояние.

Отсюда видно, что амплитуда поля в ближней зоне пропорциональна r^{-3} , а в дальней зоне пропорциональна r^{-1} . Поэтому естественное поле в сейсмоактивной зоне можно приближенно рассматривать как сумму дальнего (атмосферно-грозового) E_L и ближнего (литосферного) E_G полей :

$$E \approx E_G + E_L = \frac{E_L^0}{r_G} + E_L^0 \frac{a^2}{f^2 r_L^3} \quad (2)$$

Здесь E_L^0, E_G^0 — эффективные амплитуды грозового и литосферного источников в месте их возникновения, r_L, r_G — расстояния от детектора до источников - грозового и литосферного.

Для эффективного исследования сигналов необходимо, чтобы полезный сигнал превосходил сигнал помехи $\frac{E_G}{E_L} > 1$. К сожалению, в нашем случае это условие не выполняется. Разработка метода регистрации-выделения сигналов литосферных источников сводится к поиску такой процедуры измерений параметров поля $F(E)$, которая позволила бы удовлетворить неравенство

$$\frac{F(E_G)}{F(E_L)} > 1. \quad (3)$$

В выражении (3) аргументы функции числителя и знаменателя в левой части неравенства имеют различные степени x . Поэтому в качестве такой функции можно использовать пространственную производную, которую достаточно просто реализовать в виде измерительной процедуры.

Введем вспомогательное расстояние в окрестности детектора, удовлетворяющее условиям $x \ll r_L$, $x \sim r_G$. Тогда соотношение (3) можно переписать в виде

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{E_G^0}{r_G + x} \right) / \frac{d}{dx} \left(\frac{E_L^0 a^2}{f^2 (r_L + x)^3} \right) > 1 \quad (4)$$

После дифференцирования (4) при $x = 0$ оно приобретает вид

$$\frac{E_G^0 f^2 r_L^4}{3a^2 E_L^0 r_G^2} > 1 \quad (5)$$

Оценки этого неравенства в диапазоне частот $f \sim 1 \div 10^3$ Гц при расстояниях до центра грозовой активности порядка мегаметров ($r_L \sim 10^9$ м), до литосферного источника в сотни метров ($r_G \sim 10^3$ м), напряженности пробоя воздуха при молниевом разряде $E_L^0 \sim 10^6$ В/м, напряженности поля, наводимой дислокационным движением в горной породе $E_{G0} \sim 10^{-10} \div 10^{-7}$ в/м [19, 20, 21], показывают что это неравенство выполняется с большим запасом. Иными словами, в частотном диапазоне $f \sim 1 \div 10^3$ Гц сигнал литосферного источника может быть уверенно зарегистрирован и выделен из сильных помех атмосферно-грозового происхождения с использованием электромагнитного датчика, основанного на регистрации пространственной производной электромагнитного поля. Отметим, что таким образом может быть выделен как сигнал литосферной эмиссии, так и сигнал индукционного происхождения — вызванный токами, наведенными полем удаленных источников (приэкваториальных гроз) в контрастных по электропроводности геологических телах. При этом исходный сигнал, вызывающий индукционные токи, будет подавлен. Практическая реализация такого датчика представляет собой квадрупольную антенну - систему из двух разнесенных в пространстве идентичных дипольных антенн с противоположно ориентированными дипольными моментами [4, 5].

Свойства скважины-датчика

Условия распространения волн в земной коре с увеличением глубины улучшаются, а приближение к поверхности, напротив. Поэтому для эффективного исследования волновых полей литосферы необходимо долучение сигналов с возможно большей глубины. Такой доступ возможен в рудниках, шахтах или с помощью скважин, охватывающих большие территории и разнообразие геологических условий.

С радиофизической точки зрения скважина представляет собой 1. волновод продольных акустических и электромагнитных колебаний; 2. преобразователь поперечных электромагнитных и акустических колебаний в продольные колебания; 3. коллектор акустических и электромагнитных продольных колебаний толщи недр; 4. резонансную структуру. Обсадная труба скважины представляет собой магнитопровод, позволяющий извлечь магнитную компоненту электромагнитной эмиссии недр на поверхность. Кроме того она является магнитоупругим преобразователем акустических колебаний в электромагнитные (эффект Виллари). Она является хорошим проводником, погруженный в плохо проводящую среду породы. Вертикальная компонента электрического поля приводит к появлению вертикально направленных токов в материале трубы, которые в свою очередь приводят к возникновению магнитного вихря с осью вдоль оси обсадной трубой.

Обработка данных при несимметричном квадруполе

Использование скважин при компенсационном приеме парой антенн порождает дополнительные сложности, поскольку одна из антенн использует стальную обсадную трубу скважины в качестве ферритового сердечника, являющегося одновременно магнитопроводом для канализации магнитной компоненты электромагнитных колебаний на поверхность. Вторая антенна регистрирует только помеховый сигнал, который используется для выделения полезного литосферного сигнала. Амплитудно-частотные характеристики этих антенн затруднительно сделать идентичными для качественной компенсации помехового сигнала. Поэтому необходимо осуществлять независимую регистрацию сигнала каждой антенной, а компенсацию проводить на стадии предварительной обработки. Для этого при обработке вводят весовую функцию, позволяющую компенсировать различие АЧХ антенн. Спектры мощности сигнала смеси и компенсирующего сигнала: $J_0(\omega) = |\tilde{F}(I_0)|^2$, $J_k(\omega) = |\tilde{F}(I_k)|^2$. Здесь соответственно J , $|\tilde{F}|$, I_0 , I_k спектр мощности, модуль преобразования Фурье, сигнал смеси и компенсирующего сигнала. Поскольку литосферный сигнал значительно слабее помехового, можно найти весовой коэффициент в предположении, что средние спектры мощности сигнала смеси и компенсирующего сигнала должны быть равны с точностью до весовых коэффициентов: $\widehat{F(\omega)} \approx a(\omega) \cdot \widehat{I_k(\omega)}$. Здесь символом \widehat{R} обозначено среднее значение R .

Для нахождения весовой функции $a(\omega)$ воспользуемся методом наименьших квадратов, выбрав в качестве целевой функции $F(\omega) = (I_0(\omega) - a_1 \widehat{I_k(\omega)})^2$. Минимизируя целевую функцию $\frac{\partial F(\omega)}{\partial a_1(\omega)} = 0$, получаем весовые коэффициенты для всех компонент спектра мощности $a_1(\omega) = \frac{\widehat{I_0(\omega)I_k(\omega)}}{\widehat{I_k(\omega)^2}}$. В этом случае спектр мощности очищенного от помех литосферного сигнала получаем в виде $I_l(\omega) = I(\omega) - a_1(\omega)I_k(\omega)$. Пример спектров мощности смеси, компенсирующего сигнала и результат выделения литосферного сигнала демонстрирует рисунке.

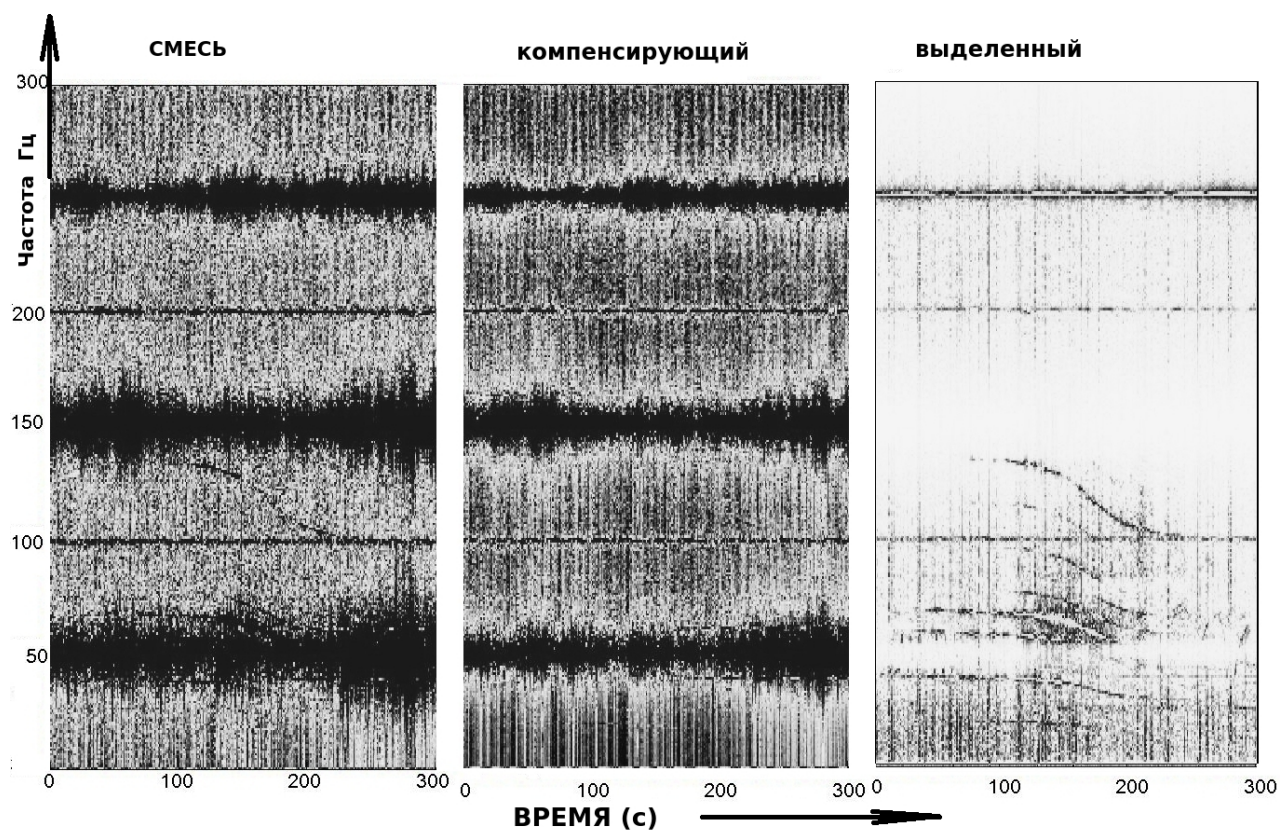


Рисунок. Спектры мощности сигналов. Слева - смесь, в центре - компенсирующий, справа - результат

Заключение

Обнаруженное в конце прошлого века проявление сейсмических событий в электромагнитном поле стало основой развития новой области знания - сейсмоэлектромагнетизма. Электромагнитные явления, сопутствующие землетрясениям, происходят в широком диапазоне частот, сопровождая и предшествуя землетрясения. Наиболее заметные этого проявления приходятся на СНЧ-ОНЧ диапазон. Сложность исследований этого явления обусловленная сильным влиянием основных видов естественного излучения - излучения грозных разрядов, может быть в значительной мере, если не полностью, устранена при использовании рассмотренных в настоящей работе подходов и методов.

Список литературы

- [1] Уваров В. Н., "Электромагнитное проявление литосферы в СНЧ-ОНЧ диапазоне", *Геофизический журнал*, **34:6** (2012), 133–146, [Uvarov V. N. Elektromagnitnoe proyavlenie litosfery v SNCh-ONCh diapazone. Geofizicheskiy zhurnal. 2012. 34:6. 133–146 (in Russian)].
- [2] Голицын Г. С., *Геофизика*, Москва, Мир, 1964, 500 с., [Golitsyn G. S. Geofizika. Mir. Moskva. 1964. 500 (in Russian)].
- [3] Яковицкая Г. Е., *Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии*, Новосибирск, Параллель, 2008, 315 с., [Yakovitskaya G. E. Metody i tekhnicheskie sredstva diagnostiki kriticheskikh

- sostoyaniy gornykh porod na osnove elektromagnitnoy emissii. Parallel'. Novosibirsk. 2008. 315 (in Russian)].
- [4] Уваров В. Н., Дружин Г. И., Санников Д. В., “Электромагнитное излучение литосферного происхождения. Метод обнаружения и первые результаты.”, *Приборы и техника эксперимента*, 2010, №26, 131-137, [Uvarov V.N., Druzhin G.I., Sannikov D.V. Elektromagnitnoe izluchenie litosfernogo proiskhozhdeniya. Metod obnaruzheniya i pervye rezul'taty. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2010. 26. 131-137 (in Russian)].
- [5] Уваров В.Н., Дружин Г.И., Пухов В.М., “Способ пассивной локации близко расположенных источников электромагнитного излучения на фоне мощных излучений удаленных источников”, *Патент РФ G01V 3/08 № 2473101, 30.06.2011.*, 2011, № 2473101, [Uvarov V.N., Druzhin G.I., Pukhov V.M. Sposob passivnoy lokatsii blizko raspolozhennykh istochnikov elektromagnitnogo izlucheniya na fone moshchnykh izlucheniyy udalennykh istochnikov. Patent RF G01V 3/08 № 2473101, 30.06.2011. 2011. № 2473101 (in Russian)].

Поступила в редакцию / Original article submitted: 08.02.2016