

DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-55-65

ФИЗИКА

УДК 551.594

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ЛИТОСФЕРЫ

В. И. Уваров, Е. И. Малкин, Д. В. Санников

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

E-mail: uvarovvnng@yandex.ru

Сформулирован ряд критериев, позволяющих выделить излучение литосферного происхождения из атмосферно-грозового и магнитосферно-ионосферного естественного излучения. На основе найденных критериев синтезирован метод регистрации и выделения электромагнитных сигналов литосферы. Был проведен полевой эксперимент по синхронной регистрации сигналов от пяти различных электромагнитных и одного акустического датчика в сейсмоактивном регионе. Предварительный анализ данных показал наличие коррелированности фрагментов данных акустического и квадрупольного каналов. Для выявления связи акустических и электромагнитных проявлений литосферных процессов использован метод наложения эпох.

Ключевые слова: ОНЧ излучение, квадрупольная антенна, метод наложения эпох

© Уваров В. И., Малкин Е. И., Санников Д. В., 2016

PHYSICS

MSC 86A25

ELECTROMAGNETIC MANIFESTATION OF GEOACOUSTIC EMISSION OF THE LITHOSPHERE

V. N. Uvarov, E. I. Malkin, D. V. Sannikov

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

E-mail: uvarovvnng@yandex.ru

Formulated a number of criteria in order to distinguish the radiation of a lithospheric origin of the atmosphere-magnetosphere and magnetosphere-ionosphere to natural radiation. Based on the criteria of the synthesized method of recording and detecting the electromagnetic signals of the lithosphere. Was conducted a field experiment on simultaneous registration of signals from five different electromagnetic and one acoustic sensor in a seismically active region. Preliminary data analysis showed the presence of correlation of pieces of data of acoustic and quadrupole channels. To reveal the connection between acoustic and electromagnetic manifestations of lithospheric processes used the method of superposition of epochs.

Key words: VLF radiation, quadrupole antenna, the method of superposition of epochs

© Uvarov V. N., Malkin E. I., Sannikov D. V., 2016

Введение

Возникающее, под влиянием механических напряжений, акустическое и электромагнитное излучение твердого тела, являются мощным инструментом исследования динамики дефектов твердого тела [1]-[4]. Поэтому является естественным расширение этих исследований на геофизику литосферных процессов в условиях естественного залегания.

Исследования как акустической, так и электромагнитной эмиссий литосферы имеют богатую историю: проводилось достаточно много лабораторных и полевых исследований, построены теоретические модели как элементарных, так и мезомасштабных процессов, сопровождающих деформацию породы, проведены многочисленные исследования акустической и электромагнитной эмиссии деформируемой горной породы в лабораторных и полевых условиях, в буровых скважинах, рудниках и шахтах [5]-[9].

Общие принципы взаимосвязи акустических и электромагнитных возмущений в земной коре понятны - они обусловлены взаимодействием атомов в твердом теле. Однако характер взаимосвязи между этими возмущениями в коре малоисследован. В настоящей работе поставлена задача выявления связи акустической компоненты с компонентами естественного электромагнитного поля.

Отличительные признаки электромагнитного излучения литосферного происхождения

Естественное электромагнитное поле, регистрируемое антенной на поверхности Земли, представляет собой смесь полей различного происхождения. Его наиболее мощная компонента связана с атмосферно-грозовой активностью. Компонента магнитосферно-ионосферного происхождения особенно сильно проявляет себя во время магнитных бурь. Литосферная компонента существенна в районах повышенной сейсмической активности. Электромагнитное излучение, связанное с технической деятельностью человека, особенно в диапазоне промышленных частот, существенно в местах с высокой плотностью населения.

Исследования электромагнитного излучения литосферы должны опираться на критерии, позволяющие выделить это излучение из естественного электромагнитного поля. При формировании этих критериев следует учесть следующее.

1. Ожидаемый уровень электромагнитного проявления литосферы в обычной ситуации значительно ниже среднего уровня поля естественного электромагнитного атмосферно-грозового и магнитосферного происхождения [7].

2. Естественное электромагнитное поле над поверхностью Земли является проявлением релаксационных процессов различной природы имеющих лавинный характер и потому представляет собой импульсное излучение со случайной амплитудой.

3. Моменты возникновения, характер и амплитуды индивидуальных актов релаксации носят случайный характер.

4. При распространении электромагнитного излучения в земной коре потери составляют десятки дБ/м [10]. Поэтому оказывается возможным регистрировать сигналы только от ближайших литосферных источников, расстояние до которых измеряется десятками метров, что значительно меньше длины волны. Поэтому их расположение относится к ближней зоне приемника.

5. Подавляющее число источников атмосферно-грозового происхождения находится в азиатском, африканском и американском центрах мировой грозовой активности, где ежесекундно происходит 100 – 300 молниевых разрядов. Излучения грозового происхождения распространяется главным образом в волноводе между земной поверхностью и ионосферой, где потери составляют от долей до единиц децибела на километр [11]. Поэтому для волн КНЧ-СНЧ диапазона источники мировых центров гроз находятся в дальней (волновой) зоне.

Таким образом, наиболее существенное отличие в параметрах электромагнитного излучения источников грозового и литосферного происхождения связано с принадлежностью к зоне локализации источника относительно детектора. Именно эти обстоятельства оказываются решающими для выбора метода выделения и регистрации излучения литосферных источников.

Синтез метода

Реализация критериев выделения излучения литосферного происхождения из естественного осуществляется путем технической реализации критериев в виде алгоритмов, программ или устройств, осуществляющих обработку сигналов, несущих информацию – это приемник и программы обработки данных.

При анализе поля, создаваемого источниками естественного электромагнитного излучения, достаточно рассматривать излучатели минимальной мультипольности – дипольные, обладающие наибольшей характерной длиной распространения.

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

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

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.

Из выражения (1) видно, что в ближней зоне амплитуда поля асимптотически описывается выражением $A_{r \rightarrow 0} \rightarrow r^{-3}$, в дальней зоне – выражением $A_{r \rightarrow \infty} \rightarrow r^{-1}$.

Приближенно естественное поле в сейсмоактивной зоне можно рассматривать как сумму полей атмосферно-грозового $E_L = \frac{E_L^0 a^2}{f^2 r_L^3}$ и литосферного $E_G = \frac{E_G^0}{r_G}$ полей:

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

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

При оценках следует учесть, что напряженность поля в области возникновения грозовых источников гораздо больше напряженности поля литосферных источников $E_L^0 \gg E_G^0$.

Это же можно сказать и об амплитудах полей в точке наблюдения $E_L \gg E_G$. Кроме того, расстояние до грозовых источников значительно больше чем до литосферных $r_L \gg r_G$.

Все это говорит о том, что прямые измерения поля не позволят выделить сигналы ординарных литосферных событий.

Поэтому разработка метода выделения сигналов литосферных источников сводится к поиску такой процедуры измерений параметров поля $F(*)$, которая позволяет выделять и регистрировать слабые источники ближней зоны E_G на фоне сильных атмосферных событий E_L .

Для корректности дальнейшего анализа необходимо ввести вспомогательное расстояние в окрестности детектора $x \sim r_G$.

Тогда условие обнаружения сигнала близко расположенного слабого источника на фоне доминирующего сигнала удаленного источника можно записать в виде

$$F \left\{ \frac{E_L^0 a^2}{f^2 (r_L + x)^3} \right\} < F \left\{ \frac{E_G^0}{r_G + x} \right\}. \quad (3)$$

Из этого соотношения видно, что аргументы правой и левой сторон неравенства имеют различные степени x . Нетрудно понять, что в качестве такой функции можно использовать производную, по x , которую достаточно просто реализовать в виде измерительной процедуры. Используя эту функцию, перепишем выражение (3) в виде

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

С учетом $x \sim r_G$ неравенство (4) можно преобразовать к виду

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

Оценим, в какой мере это условие выполняется для диапазона частот $f \dim 10 \div 10^3$ Гц.

Расстояние до центров грозовой активности измеряется десятками мегаметров, до литосферного источника – десятками метров.

Амплитуду напряженности при молниевом разряде оценим как величину по порядку равную напряжению пробоя воздуха $\dim 10^6$ В/м.

Для горной породы наводимая дислокационным движением напряженность поля по разным данным $\dim 10^{-10} \div 10^{-7}$ В/м [3, 4].

Подставляя эти данные в выражение (5) видим, что неравенство выполняется:

$$10^2 \leq \frac{r_L^2 f}{a r_G} \sqrt{\frac{E_G^0}{3E_L^0}} \leq 10^6.$$

Выполнение соотношения (5) означает, что в частотном диапазоне $10 \div 10^3$ 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.

При практической реализации такой датчик представляет собой квадрупольную антенну – систему из двух одинаковых разнесенных в пространстве дипольных антенн с противоположно ориентированными дипольными моментами. Более подробно с этим подходом можно ознакомиться в [12, 13].

Постановка эксперимента

Полевой эксперимент по синхронной регистрации электромагнитного и акустического полей проводился на наблюдательной станции ИКИР ДВО РАН в долине реки Карымшина (Южная Камчатка) (рис. 1).



Рис. 1. Дислокация проведения эксперимента

Она расположена в области пересечения региональных разломов Малко-Петропавловской зоны поперечной дислокации северо-западной ориентировки в Паратунской раздвиговой зоне у подножия экструзивного купола сопки Горячая. Этот район характеризуется высоким уровнем микросейсмичности и малым уровнем промышленных помех.

Использовались несколько видов датчиков, каждый из которых соответствовал при записи определенному информационному каналу (рис. 2).

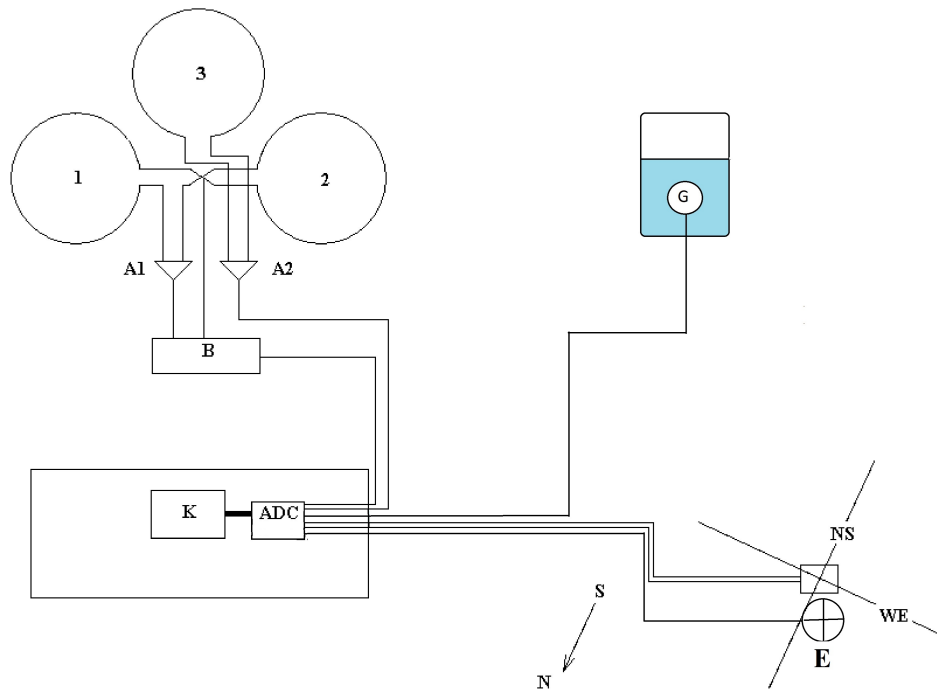


Рис. 2. Схема эксперимента. 1 и 2 – плечи квадрупольной антенны, 3 – Z-антенна, A1, A2 – антенные усилители Q и Z каналов, B – симметризирующее устройство квадрупольной антенны, G – акустический датчик, NS, WE – антенны север-юг и запад-восток с антенными усилителями, E – электрическая антенна с усилителем

1. Квадрупольная магнитная антенна представляет собой две встречно включенные магнитные рамки. В дальнейшем для канала регистрации данных квадрупольной антенны используется обозначение Q-канал.

Чувствительность $\dim 10^{-15} \text{ Т Гц}^{-0.5}$.

2. Три взаимно перпендикулярно ориентированные рамочные магнитные антенны.

Плоскость одной из рамок расположена горизонтально (Z-канал), а плоскости двух других расположены вертикально и ориентированы по странам света (WE- и NS-каналы).

Чувствительность по WE и NS-каналам $\dim 10^{-16} \text{ Т Гц}^{-0.5}$, Z-канала $\dim 10^{-15} \text{ Т Гц}^{-0.5}$.

3. Электрическая штыревая вертикально стоящая антенна имела чувствительностью $\dim 10^{-8} \text{ А м Гц}^{-0.5}$ (E-канал).

4. Акустический датчик колебаний грунта (A-канал). Этот датчик представлял собой гидрофон в искусственном водоеме, где вода играла роль иммерсии, минимизирующей акустическое сопротивление границы с геологической средой.

Антенные усилители установлены в непосредственной близости от антенн для минимизации помех. Сигналы с этих усилителей поступают на регистрирующее устройство (компьютер) по экранированным витым парам.

Эксперимент проводился в условиях устойчивой сухой погоды и состоял из двух сеансов непрерывной синхронной регистрации данных с этих датчиков. Общее время наблюдения – 49 часов. Частота дискретизации – 44100 Гц. Расстояние от пункта регистрации до акустического датчика – 20 м, до Q и Z – датчиков – 35 м, до WE, NS и E датчиков – 180 м. Разницей времен распространения сигнала от различных

датчиков можно пренебречь, поскольку интервал времени между соседними отсчетами ($2 \cdot 10^{-5}$ с) значительно превосходит время распространения сигнала по кабелю от датчиков до регистратора ($10^{-7} \div 10^{-6}$ с). Характерный размер пространственной зоны чувствительности акустического датчика в связи с сильным затуханием звука в грунте составляет несколько метров [6]. Поэтому приближенно можно считать, что расположение источника акустического излучения совпадает с положением акустического датчика. Время распространения электромагнитного сигнала в грунте при типичных значениях проводимости из окрестности акустического датчика, составляет не более $4 \cdot 10^{-7}$ с, т. е. существенно меньше периода дискретизации. Все это означает, что задержка сигнала при распространении электромагнитного возмущения в грунте не должна влиять на момент прихода сигнала в регистрирующее устройство. Вместе с тем не исключено влияние конструктивных особенностей предварительных усилителей на различие моментов регистрации различных каналов.

Анализ результатов

Предварительный визуальный анализ показал сильное различие характера данных разных каналов.

Более детальный анализ волновых форм каналов позволил обнаружить в окрестностях экстремальных значений акустического сигнала согласованный ход сигналов в акустическом и квадрупольном каналах. Приведенный (рис. 3) пример подтверждает это.

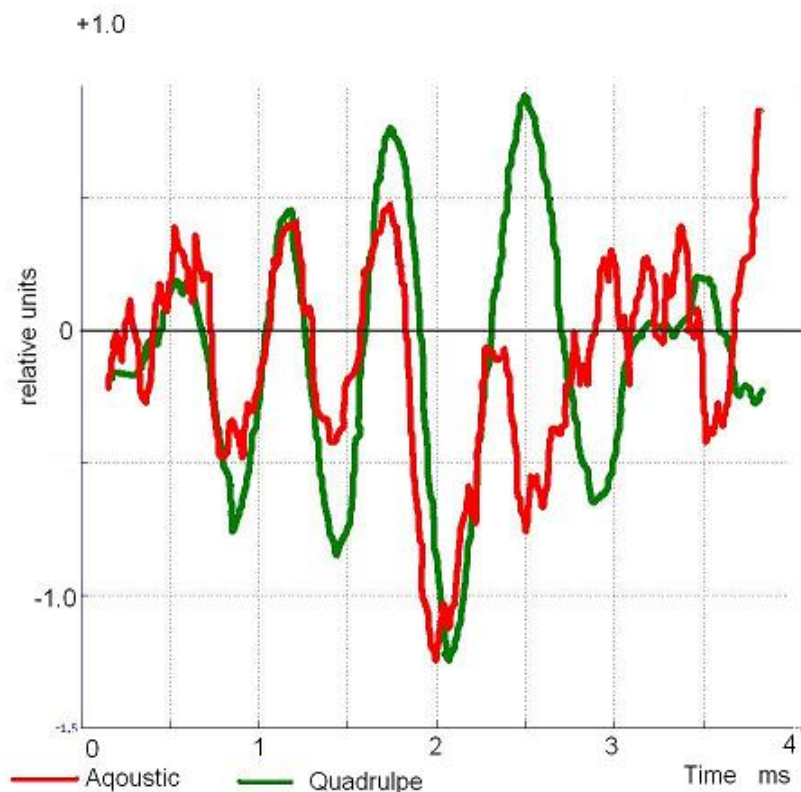


Рис. 3. Пример сильного сигнала в акустическом и квадрупольном каналах

Поскольку поток акустических событий значительно меньше потока электромагнитных, при выявлении акусто-электромагнитных связей целесообразно ограничиться анализом электромагнитных событий, произошедших в ближайшие моменты времени к акустическим событиям.

Для этого были выбраны фрагменты записи акустического канала, содержащие сильный всплеск сигнала – выброс, превосходящий по амплитуде среднее значение не менее чем в 10 раз. Длительность фрагмента также превышала характерную длительность всплеска не менее чем в 10 раз. Такой выбор позволил выделить электромагнитные сигналы с высокой вероятностью имеющие литосферное происхождение. Всего было проанализировано около 400 000 таких эпизодов.

Следует отметить, что плотность событий в акустическом канале существенно ниже (в 10-100 раз), чем в электромагнитных каналах. Однако оказалось, что использование аппарата кросскорреляционной функции к временным рядам, обладающим сходной волновой формой проявления различных процессов с существенно различными плотностями потоков событий, неэффективно. Это обстоятельство побудило искать иной метод выявления связей между импульсными процессами в разных каналах. К числу методов, нечувствительных к различию плотностей потоков событий в разных каналах, относится использованный нами метод наложения эпох.

Метод наложения эпох

Как упомянуто выше, в электромагнитном канале поток событий атмосферно-грозового происхождения значительно превосходит литосферный поток событий. Поэтому для выявления связи между различными каналами используется метод наложения эпох, позволяющий усреднять фрагменты выборки исследуемого сигнала относительно опорного реперного события опорного канала. Реперное событие характеризуется признаками, позволяющими отличать его от других событий, например, задаваемым интервалом времени между такими событиями при поиске скрытых периодичностей, или достаточно большой амплитудой по сравнению с фоном, позволяя считать его выбросом.

Метод наложения эпох представляет следующую процедуру. Используются две выборки данных, полученные в разных каналах – опорном I_r и исследуемом I_s . Предполагается, что характер связи между процессами в каналах определяется функцией связи $K(I_r, \tau_r, \tau_s)$, зависящей от разности моментов событий в опорном и исследуемом каналах $\Delta\tau_{rs} = \tau_s - \tau_r$ и монотонно растущей функцией опорного сигнала $I_s \dim I_r$:

$$I_s(\tau_s) = \int_{-\infty}^{\infty} K(I_r, \tau_s - \tau_r) I_r(\tau_r) d\tau_r.$$

Если выбрать фрагмент данных в окрестности сильного максимума в которых смежные с максимумом значения близки к фоновым

$$I_r(\tau) \gg I_r(\tau + \Delta\tau); I_r(\tau) \gg I_r(\tau - \Delta\tau),$$

то это соотношение в этом интервале можно приближенно записать в следующем виде:

$$I_s(\tau_s) \approx K(I_r, \tau_s - \tau_r) I_r(\tau_r).$$

Если теперь осуществить усреднение по всем возможным значениям моментов максимумов опорного сигнала, удовлетворяющим условиям (6):

$$\overline{I_s(\tau_s)} = \sum_r K(I_r, \Delta\tau_{sr}) I_r(\tau_r) = K(I_r, \tau_s - \tau_r) \overline{I_r(\tau_r)}, \quad (6)$$

и центрировать отсчет времени усредненной выборки относительно момента максимума опорного сигнала положив $\tau_r = 0$, то получим

$$\overline{I_s(\tau_s)} = K(I_r, \tau_s) \overline{I_r(0)}.$$

Здесь τ_s – имеет теперь смысл интервала времени между максимумами усредненного опорного сигнала и исследуемого каналов. Иными словами отрицательным значениям τ_s будет соответствовать опережение исследуемым сигналом опорного и наоборот – положительным значениям τ_s соответствует запаздывание исследуемого сигнала по отношению к опорному. По существу метод наложения эпох представляет собой восстановление функции связи двух процессов. При этом один из процессов (опорный) используется для формирования последовательности реперных моментов. В этом случае функция связи может определяться следующим образом:

$$K(I_r, \tau_s) = \frac{\overline{I_s(\tau_s)}}{\overline{I_r(0)}}.$$

Пример такого подхода использован в [14].

Использование периодически расположенных реперов позволяет выявить скрытые периодичности произвольной формы, например формы кривой блеска пульсаров. В нашем случае метод наложения эпох использован для выявления связи между акустическим и электромагнитными каналами.

Для проверки эффективности этого метода были рассчитаны функции связи различных каналов по отношению к опорному (рис. 4).

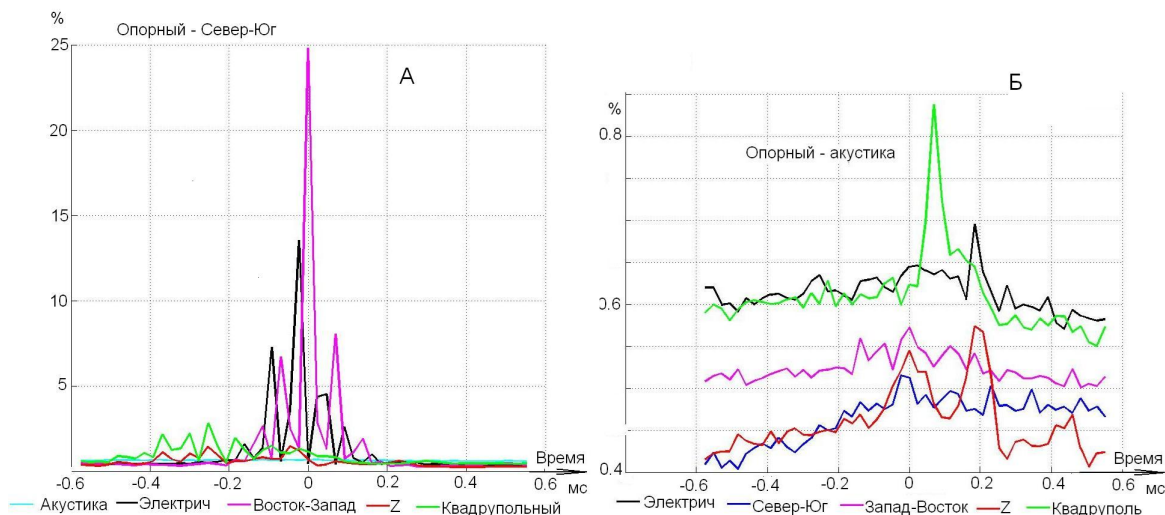


Рис. 4. Функции связи между различными каналами. А – опорным является сигнал от магнитной антенны с ориентацией Север-Юг. Б – опорным является акустический канал

В приведенном примере (рис.4А) в качестве опорного выбран канал магнитной антенны, плоскость которой ориентирована в направлении Север-Юг. При визуальном сравнении сигналов от антенн Север-Юг и Запад-Восток наблюдается хорошая

корреляция. Применение метода наложения эпох достаточно наглядно подтверждают это, демонстрируя хорошо выраженный максимум в точке совпадения (0 смещения). Иными словами, события в каналах Север-Юг и Запад-Восток синхронны, а частотность их совпадения достигает 25%. Также достаточно коррелированы и события в канале Север-Юг и электрическом канале. Однако в этом случае происходит опережением событиями в электрическом канале события магнитного канала. Это может быть объяснено различием приемной и регистрирующей аппаратуры в электрическом и магнитном каналах.

На рис.4Б показаны значения акусто-электромагнитных функций связи в окрестности ($-0.8 \div 0.6$) мс относительно акустического выброса. Наличие максимума этой кривой является указанием на наличие электромагнитного проявления акустического возмущения, произошедшее на 0.1 мс позже акустического (на рис. 3Б это зеленая линия). Наблюдаемая величина смещения электромагнитного сигнала относительно акустического может быть объяснена влиянием регистрирующей аппаратуры. Более слабые проявления акустики наблюдались также в Z канале (на рис. 4Б - черная кривая). На кривых функций связи акустического канала с другими каналами не отмечено электромагнитных проявлений акустического возмущения. Наибольшая связь наблюдается между акустическим и квадрупольным каналами. Смещение около 0.7 мс может быть объяснено влиянием приемной аппаратуры. Частотность проявления акустического канала в квадрупольном составляет около 0.84%. Проявление акустики в вертикальной магнитной составляющей незначительно превышает значение шумового фона – около 0.7% . Проявление акустического сигнала в остальных каналах остается на уровне шумового фона.

Обсуждение результатов и выводы

Наиболее восприимчивой к сигналам релаксационных событий литосферы оказалась квадрупольная антенна, регистрирующая горизонтальную пространственную производную вертикальной составляющей магнитного поля.

Отсутствие связи горизонтальных магнитных компонент с акустическим полем означает, что магнитная компонента электромагнитного поля литосферного происхождения имеет преимущественно субвертикальное направление. Это в свою очередь указывает на горизонтальную поляризацию электрической компоненты этого поля.

Проявление акустического излучения в квадрупольном канале указывает на небольшое расстояние до источников этого излучения.

Наличие проводящей ионосферы над проводящей поверхностью Земли приводит к формированию плоского резонатора для вертикально распространяющихся волн с горизонтальной электрической компонентой. Характерный размер области когерентности и характерная область распространения излучения от источника сравнимы с длиной волны излучения. Эти обстоятельства позволяют надеяться на обнаружение электромагнитных проявлений сейсмических событий периода подготовки землетрясений с использованием длиннобазовых квадрупольных магнитных антенн с горизонтальным расположением их плоскости.

Заключение

Для регистрации естественной акустической эмиссии литосферы было частично использовано оборудование лаборатории акустических измерений. В связи с этим авторы настоящего исследования выражают глубокую благодарность руководителю лаборатории акустических излучений Марапульцу Ю. В. и ведущему инженеру этой лаборатории Торгунскому В. Е., доброжелательное отношение и техническая поддержка которых способствовала успешности выполнения настоящих исследований.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке грантов Дальневосточного отделения Академии наук Российской Федерации № 12-111-А-02-031 и Российского фонда фундаментальных исследований № 13-03-01159.

Список литературы

- [1] Hadjicontis V., Mavromatou C., Antsygina T.N., Chishko K.A., “Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals”, *Phys.Rev. B*, **76**:2 (2007), 024106.
- [2] Sikula J., Mori Y., Lokajicek T., Kockavy P., Majzner J., Sedlak P., Crack creation kinetics characterization by electromagnetic and acoustic emission (Proc. 28th European Conf. AE Testing, Krakov, Poland, September 2008), 118-123.
- [3] Чишко К. А., Чаркина О. В., “Излучение электромагнитных волн краевыми дислокациями, движущимися в ионных кристаллах”, *Физика твердого тела*, **38**:9 (1996), 2775–2786.
- [4] Чишко К. А., Чаркина О. В., “Электромагнитное излучение подвижных дислокационных элементов в ионном кристалле”, *Физика твердого тела*, **43**:10 (2001), 1821–1827.
- [5] Mori Y., Sikula J., “Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock sample under deformation”, *J. Acoustic Emission*, 2009, № 27, 157–166.
- [6] Pralat A., Wojtowicz S., “Electromagnetic and acoustic emission from the rock-experimental measurements”, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2004, № 1, 111–119.
- [7] Богданов Ю. А., Воронин В. И., Уваров В. Н., Черняков А. М., “Электромагнитное проявление структуры недр”, *Геофизический журнал*, **25**:4 (2003), 117–125.
- [8] Яковицкая Г. Е., *Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии*, Новосибирск, 2008, 315 с.
- [9] Scott D.F., Theodore J.W., Steven J.K., Investigation of electromagnetic emissions in a deep underground mine (In Proceedings of the 23rd International Conference on Ground Control in Mining, 2004, pp. 125-132).
- [10] Тархова А. Г., *Электроразведка. Справочник геофизика*, Недра, М., 1980, 518 с.
- [11] Альперт Я. Л., *Распространение электромагнитных волн и ионосфера*, Наука, М., 1972, 563 с.
- [12] Уваров В. Н., Дружин Г. И., Пухов В. М., Санников Д. В., *Способ пассивной локации близко расположенных источников электромагнитного излучения на фоне мощных излучений удаленных источников*, Патент РФ G01V 3/08 2473101, 30.06.2011.
- [13] Уваров В. Н., Дружин Г. И., Санников Д. В., “Электромагнитное излучение литосферного происхождения. Метод обнаружения и первые результаты”, *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 6, 131–137.
- [14] Мищенко М. А., “Статистический анализ возмущений геоакустической эмиссии, предшествующих сильным землетрясениям на Камчатке”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2011, № 1(2), 57–65.