

## Электромагнитное проявление литосферы в СНЧ-ОНЧ-диапазоне

© В. Н. Уваров, 2012

Институт космических исследований и распространения радиоволн  
Дальневосточного отделения РАН, Камчатский край, с. Паратунка, Россия  
Поступила 19 июля 2011 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом*

Стисло проаналізовано сучасний стан досліджень природного електромагнітного поля на поверхні Землі у ННЧ-ДНЧ-діапазоні. Виконано оцінки співвідношення рівнів полів літосферного та грозового походження. Показано, що рівень електромагнітного поля літосферного походження на декілька порядків менший за рівень поля грозового походження. Обґрунтовано використання квадрупольної антени для виділення сигналів близько розташованих джерел. За високої мікросейсмічності та відсутності інших джерел ці джерела найімовірніше мають літосферне походження. Наведено деякі результати таких вимірів. Розглянуто пасивні методи електромагнітної геофізичної розвідки. Виявлено, що методи, які ґрунтуються на усередненій бінаризації амплітуди природного електромагнітного поля, переважно фіксують його флюктуативну частину.

Brief analysis of the current state of research in natural electromagnetic field at the Earth's surface in the SLF-VLF range has been conducted. A set of estimations of field levels ratios of lithospheric and storm origin has been made. It has been shown that the level of electromagnetic field of lithospheric origin is several orders of magnitude smaller than that one of storm origin. Justification for the use of a quadruple antenna is made, which distinguishes signals of closely spaced sources. These sources are most likely of lithospheric origin in case of high microseismicity and absence of other sources. Some results of such measurements are given. A brief review and analysis of existing passive methods of electromagnetic geophysical exploration has been conducted. It has been shown that the methods based on the averaged binarization, mainly contain the fluctuating part of natural electromagnetic field.

**Введение.** Проблема электромагнитного излучения литосферного происхождения, имеющая более чем вековую историю [Varley, 1871], по-прежнему привлекает пристальное внимание [Electromagnetic..., 1994; Atmospheric..., 1999]. Причиной тому служит перспективность электромагнитной диагностики земной коры, поскольку электромагнитное излучение — наиболее удобный и эффективный носитель информации. Сложность исследования электромагнитного излучения коры определяется тем, что неизвестно соотношение уровней мощности поля литосферных источников и источников иной природы и отсутствует информация о каких-либо характерных свойствах сигналов литосферного происхождения, позволяющих отфильтровать эти сигналы.

Электромагнитное излучение над поверхностью Земли формируется техногенным и естественным излучением. Основным компонентом, формирующим естественное электромагнитное излучение ОНЧ-СНЧ-диапазона,

является электромагнитное излучение, возникающее при грозовых разрядах молний в приэкваториальных областях [Barr et al., 2000]. При этом электромагнитное излучение (атмосферички) чрезвычайно эффективно распространяется в волноводе, образованном поверхностью Земли и ионосферой, и хорошо обнаруживается даже в точке антипода молниевых разрядов [Альперт, 1972].

Это излучение внимательно изучается мировым научным геофизическим сообществом. Результаты исследований публикуются во многих широко известных научных журналах, из которых следует отметить прежде всего «Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics» и «Геомагнетизм и аэрономия».

Значительная изученность указанного феномена позволила использовать его для дистанционного зондирования в глобальном проекте по изучению тропического океана и глобальной атмосферы (TOGA) (WWLLN.net) (рис. 1).

Существенный и сильно меняющийся во

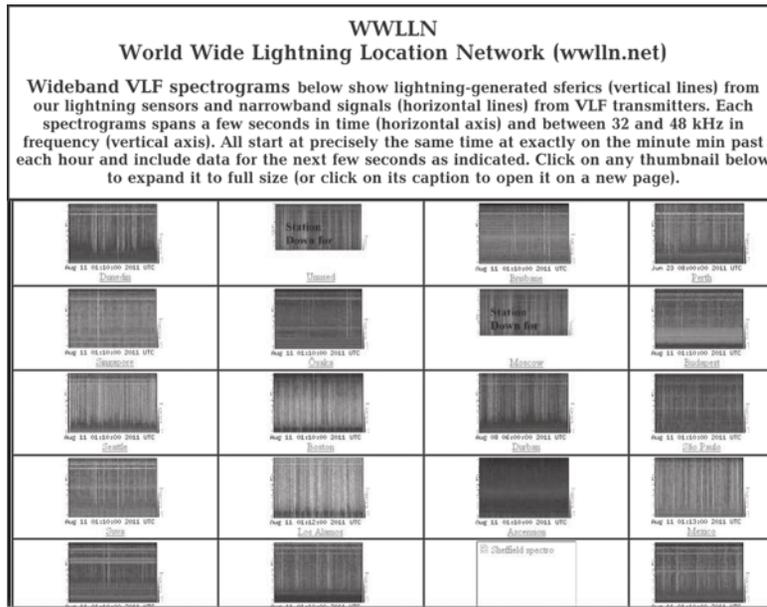


Рис. 1. Страница сайта проекта TOGA.

времени вклад создает магнитосферно-ионосферное излучение, вызванное вторжением заряженных частиц солнечного ветра [Плазменная..., 2008]. В периоды сильных магнитных бурь мощность такого излучения может достигать уровня излучения грозового происхождения. Эта компонента естественного электромагнитного поля также хорошо изучена [Bagg et al., 2000] и используется в мировой сети AWDA.net для мониторинга электронной концентрации магнитосферы.

На данное излучение наложен достаточно мощный гул, состоящий из большого количества высокочастотных гармоник силовой сети. Мощность помехи существенно зависит от уровня индустриализации территории, может быть довольно серьезным препятствием для успешных исследований естественного электромагнитного излучения, требует применения специальных методов предварительной обработки [Cohen et al., 2010] и в некоторых случаях представляет собой неустраняемую помеху.

Относительно электромагнитного излучения литосферного происхождения имеются многочисленные эпизодические наблюдения электромагнитных эффектов, приуроченных к достаточно мощным сейсмическим событиям (землетрясениям) [Электромагнитные..., 1982; Гохберг и др., 1988]. Эти явления составляют вершину айсберга электромагнитных эффектов, сопутствующих гораздо более распространенным процессам, связанным с сейсмически спокойными периодами.

В настоящее время неизвестны физически обоснованные регулярные наблюдения сигналов литосферного происхождения СНЧ-ОНЧ-диапазона в периоды сейсмического затишья.

Отметим, что в сообщениях о свойствах и использовании «активности импульсного естественного электромагнитного поля Земли (ИЕЭМПЗ)», «геополяритонного излучения», «геополяритонной спектроскопии» или «спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы» [Чебан, 2001; Богданов, Павлович, 2008; Богданов и др., 2003, 2009; Богданов, 2011; Шуман, Богданов, 2008; Саломатин и др., 1993], как показано ниже, нет четкой аргументации.

Предложенный способ регистрации и выделения литосферных сигналов [Уваров и др., 2010] пока находится на стадии изучения и еще не нашел широкого применения, хотя первые результаты обнадеживают. Несмотря на анализ довольно большого количества разнообразных механизмов механоэлектромагнитного преобразования, по-прежнему недостаточно ясны доминирующие механизмы возникновения электромагнитного излучения литосферного происхождения, особенно в условиях сейсмического спокойствия. Это обстоятельство не позволяет оценить долю энергии литосферного излучения в общем естественном поле в рамках какого-либо одного механоэлектромагнитного механизма.

Изложенное выше дает возможность констатировать следующее:

1) применяемые методы регистрации электромагнитного излучения не позволяют выде-

лять слабое излучение литосферы из мощного помехового фона грозового и магнитосферно-ионосферного происхождения;

2) неизвестны даже относительные оценки вклада электромагнитного излучения литосферного происхождения в фон естественного электромагнитного излучения;

3) неизвестны параметры сигналов литосферного происхождения, пригодные для выделения литосферного сигнала из помехового фона.

Таким образом, несмотря на относительно длительное изучение электромагнитных явлений, связанных с литосферным излучением сейсмически спокойного периода в СНЧ-ОНЧ-диапазоне, существенные успехи не достигнуты.

Главная цель настоящей работы — анализ условий, методов регистрации, выделения и анализа сигналов, несущих информацию о литосфере.

**1. Оценка параметров литосферного излучения.** При планировании экспериментальных исследований прежде всего необходима информация об ожидаемых параметрах исследуемого сигнала и его свойствах, позволяющих выделить его из множества подобных сигналов иной природы (из шума, например, из излучения грозового и магнитосферно-ионосферного происхождения).

Простейший параметр такого рода — отношение сигнал/шум.

Для оценки можно использовать относительную оценку вклада источников литосферного происхождения в общее естественное электромагнитное поле. При этом для продуктивного изучения электромагнитных проявлений литосферных процессов следует ориентироваться на сейсмически спокойный режим, когда уровень излучения формируется повсеместно и постоянно происходящими геологическими процессами.

**1.1.** Для оценки уровня литосферного сигнала в условиях сейсмического спокойствия необходимо знать величину стационарного потока механической энергии в коре и механоэлектромагнитный коэффициент преобразования. Неоднократно предполагалось, что возникновение электромагнитного излучения литосферы связано с ее неравновесностью [Богданов, Павлович, 2008; Богданов и др., 2009; Богданов, 2011; Шуман, Богданов, 2008].

Известны публикации, в которых сделаны геофизические выводы о свойствах территории, основанные на измерении усредненно-

го уровня естественного электромагнитного поля [Саломатин и др., 1993; Богданов и др., 2003, 2009; Богданов, Павлович, 2008; Шуман, Богданов, 2008; Чебан, 2011; Богданов, 2011]. Полученные результаты истолковывались как доказательство наличия спонтанной электромагнитной эмиссии земной коры, аналогичной сверхизлучению Дике [Богданов, Павлович, 2008; Шуман, Богданов, 2008; Богданов и др., 2009]. Рассмотрим возможность появления сверхизлучения в земной коре.

Возникновение излучения, связанного с неравновесным состоянием вещества, возможно при реализации достаточно широко распространенного в природе лавинно-порогового релаксационного процесса: молнии, снежные лавины, оползни, землетрясения, вспышки на Солнце, свечение Крабовидной туманности. Это примеры естественных лавинных процессов, примеры из техники — мазеры и лазеры. Заметим, что гидродинамический аналог подобного процесса — работа обычного сливного бачка.

Для осуществления такого механизма нужны следующие условия [Куклин, 2010; Меньшиков, 1999]:

1) наличие источника накачки;

2) наличие метастабильного уровня, необходимого для накопления энергии в инвертированном состоянии; время спонтанной релаксации (естественного распада) этого уровня должно быть больше характерного времени накачки;

3) наличие инверсии, т. е. состояния, при котором число частиц в возбужденном состоянии  $n(E_2)$  больше числа частиц в невозбужденном состоянии  $n(E_1)$ :  $n(E_2) > n(E_1)$ .

Лавинно-пороговый процесс имеет две фазы. В течение первой фазы происходит накачка (накопление потенциальной энергии, перевод вещества в инвертированное состояние), в течение второй — лавинообразное преобразование потенциальной энергии метастабильного состояния в иной вид энергии (кинетическую энергию в снежных лавинах, электромагнитное излучение в грозовых разрядах, излучение оптического импульса в излучающих средах, возникновение ударной волны при землетрясениях) с полным исчезновением метастабильного уровня. Эффективность накопления энергии на данном уровне определяется отношением характерного времени накачки к коэффициенту спонтанного перехода.

Применительно к электромагнитному из-

лучению этот механизм впервые был описан Дике еще в 1954 г.

Оценим возможность существования механизма Дике в литосфере. В качестве источника накачки рассмотрим энергию тектонических движений. Приближенная оценка характерного времени накачки может быть сделана в предположении, что механическая и тепловая энергии переходят друг в друга и, следовательно, взаимно пропорциональны. Примем, что перенос механической энергии в литосфере происходит вследствие конвекции. Иными словами, тектонические процессы обусловлены только различной плавучестью вещества коры в результате теплового расширения (архимедова сила). В этом случае можно ограничиться рассмотрением теплового потока, параметры которого достаточно хорошо известны. Плотность тепловой энергии на поверхности Земли  $q=C \cdot d \cdot T$ .

Положив удельную теплоемкость коры равной теплоемкости гранита  $C=0,8$  Дж/(г·К), плотность  $d=2,5$  г/см<sup>3</sup>, температуру поверхности Земли  $T=300$  К, получим плотность тепловой энергии  $q=600$  Дж/см<sup>3</sup>.

Внутренние источники тепла Земли менее значительны по мощности, чем внешние. Считается, что основными источниками являются: распад долгоживущих радиоактивных изотопов (уран-235 и -238, торий-232, калий-40), гравитационная дифференциация вещества, приливное трение, метаморфизм, фазовые переходы. Средняя для земного шара плотность геотермального потока составляет 0,064—0,075 Вт/м<sup>2</sup> ( $4 \cdot 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> в целом для Земли), т. е. примерно в 5000 раз меньше, чем средняя солнечная радиация. В глубоководных океанических желобах она изменяется в пределах 0,028—0,065 Вт/м<sup>2</sup>, на шитах — 0,029—0,049, в геосинклинальных областях и срединно-океанических хребтах — 0,100—0,300 Вт/м<sup>2</sup> и более [<http://www.mining-enc.ru/g/geotermiya/>; <http://ru.wikipedia.org/wiki/Геотермия>]. Положив средний поток тепла в коре  $S_q=7 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>, получим скорость распространения теплового потока в земной коре:

$$U = S_q / q \approx 10^{-10} \text{ м/с}.$$

С учетом характерного размера излучающей неоднородности  $\sim 10$  м характерное время изменения теплового состояния земной коры в этом масштабе (время накачки) составит  $t_e \approx 10^{11}$  с.

Время жизни системы в возбужденном состоянии определяется меньшим из времен:

либо собственным временем распада возбужденного состояния, либо характерным временем взаимодействия с соседними частицами. При отсутствии возмущений со стороны соседних частиц (в вакууме) время жизни атома в возбужденном состоянии определяется собственным временем распада (коэффициент Эйнштейна спонтанного перехода). С ростом плотности вещества частота столкновений соседних частиц увеличивается. В твердом теле время жизни возбужденного состояния определяется характерным временем межатомного взаимодействия, т. е. обратным значением частоты максимума теплового излучения среды, которая определяется законом Вина.

Тогда, согласно закону Вина, характерное время релаксации конденсированной среды равно

$$t_r = \frac{b}{T c} \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ с},$$

где  $b$ ,  $c$  — постоянная Вина и скорость света соответственно.

Сверхизлучение возможно только в случае, если характерное время накачки меньше времени релаксации:

$$\frac{t_e}{t_r} < 1.$$

В рассматриваемом примере время накачки значительно больше времени релаксации:

$$\frac{t_e}{t_r} \approx 10^{24} \gg 1.$$

Поэтому систему невозможно накачать, т. е. привести в энергетически инвертированное состояние.

Следовательно, возникновение сверхизлучения в земной коре путем накачки энергии тектоническими силами невозможно.

**1.2.** Проведем оценку соотношения уровней излучения литосферного и атмосферного происхождения, основанную на сравнении потоков энергии в земной коре и атмосфере, предположив, что естественное электромагнитное излучение возникает при переходных процессах — преобразовании энергии в лавинных пороговых процессах в атмосфере и литосфере.

Энергия естественного электромагнитного излучения атмосферы своим происхождением обязана потоку солнечной энергии. Доминирующим механизмом формирования естественного электромагнитного поля атмосферы

являются грозовые разряды. Доминирующий механизм механоэлектромагнитного преобразования в литосфере до сих пор не определен. Поэтому невозможно оценить характерные времена жизни метастабильного состояния и лавины для литосферы.

Ограничимся сравнением потоков энергии в атмосфере и литосфере.

Согласно существующим сведениям [Кондратьев, 1980; Trenberth et al., 2009], средняя мощность потока солнечной энергии составляет  $\approx 340 \text{ Вт/м}^2$ . Из этого количества  $88 \text{ Вт/м}^2$  расходуется на испарение воды. Очевидно, какая-то часть (допустим,  $10 \text{ Вт/м}^2$ ) идет на формирование статического заряда облаков и равна мощности энергии накачки.

Положим, что из среднего потока геотермальной энергии  $S_q = 7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$  в электромагнитное излучение преобразуется только  $10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ . В результате приходим к выводу о том, что уровень сигналов литосферного происхождения находится на уровне одной тысячной доли излучения атмосферно-магнитосферной природы.

**1.3.** Еще одну оценку соотношения уровней энергии атмосферного и литосферного излучения можно сделать исходя из сравнения электрофизических свойств вещества атмосферы и литосферы.

Интенсивность электромагнитного излучения, возникающего при лавинном процессе, пропорциональна плотности запасенной энергии. В свою очередь, плотность запасенной энергии пропорциональна произведению плотности потока накачки  $E_e$  на характерное время релаксации  $\tau$  метастабильного уровня:

$$I_{\text{эм}} \sim W = E_e \cdot \tau.$$

Соотношение этих интенсивностей для атмосферы и литосферы может служить дополнительным ориентиром при оценке соотношения плотностей электромагнитной энергии атмосферного и литосферного происхождения.

Характерное время релаксации зарядов в проводящей среде  $\tau$  определяется ее проводимостью  $\sigma$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ :

$$\tau = \varepsilon / \sigma.$$

Земная кора обладает достаточно хорошей удельной проводимостью [Физические..., 1984]:  $10^{-1} > \sigma > 10^{-4} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Для сравнения: удельная проводимость морской воды  $\approx 1$ , графита  $\approx 10^5$ , меди  $\approx 10^7 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Средняя проводимость атмосферы на уровне грунта

более чем на 10 порядков ниже  $\sigma \approx 10^{-18} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Отсюда диапазон характерного времени релаксации заряда в коре  $\tau \approx 10^{-10} \div 10^{-7} \text{ с}$  и в атмосфере  $\tau \approx 10^7 \text{ с}$ .

Время релаксации заряда, которое в основном определяется проводимостью, для литосферы оказывается более чем на 10 порядков меньше, чем для атмосферы.

Используя полученные ранее значения, вычислим соотношение интенсивностей электромагнитных полей атмосферного и литосферного происхождения:

$$\frac{I_a}{I_l} \approx \frac{E_a \cdot \tau_a}{E_l \cdot \tau_l} \approx 10^{20}.$$

Таким образом, интенсивность излучения атмосферного происхождения значительно превосходит интенсивность литосферного происхождения. Все оценки приводят к одному и тому же выводу: уровень излучения грозового происхождения значительно больше уровня излучения литосферного происхождения.

**2. Выделение сигналов литосферного происхождения.** Доминирующие источники сигналов атмосферного происхождения расположены в экваториальной области, источники сигналов ионосферного происхождения — в приполярных областях. Для средних широт расстояние до этих источников измеряется десятками тысяч километров. В то же время следует полагать, что источники литосферного излучения расположены более равномерно, и можно надеяться, что расстояние до ближайших литосферных источников может оказаться значительно меньшим, чем до атмосферно-ионосферных источников.

Рассмотрим простой пример.

Предположим, что амплитуда поля электромагнитной волны обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника. В этом случае для того, чтобы уравнивать принимаемые сигналы двух источников, различающихся в 10 000 раз по амплитуде, более слабый источник необходимо разместить на расстоянии в 100 раз ближе к приемнику. Для более близких источников это соотношение может быть намного выше.

Главное условие приема сигналов литосферного происхождения — использование метода, выделяющего слабые сигналы близко расположенных литосферных источников с неизвестными спектрально-временными характеристиками из мощного фона естественного излучения.

Основным параметром, определяющим эф-

эффективную дальность распространения излучения в поглощающей среде, является толщина скин-слоя — расстояние, на котором амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз [Электроразведка..., 1980].

Из зависимости, представленной на рис. 2, видно, что дальность эффективного распространения излучения уменьшается с повышением частоты и увеличением проводимости среды распространения. Поэтому наибольшей вероятностью быть обнаруженными обладают близко расположенные источники, расстояние до которых не превышает нескольких толщин скин-слоя. Дополнительные возможности селекции основаны на избирательных свойствах антенны.

Как известно, пространственные статистические свойства излучения (пространственная функция когерентности, радиус когерентности) являются функциями расстояния от источника [Рытов, 1966]. Указанные свойства могут быть использованы для выделения сиг-

налов литосферного происхождения близко расположенных источников. Для этого наряду с обычными дипольными антеннами следует применить антенну с более локализованной пространственной зависимостью чувствительности. Простейшая антенна такого рода — квадрупольная. На такой основе был разработан метод выделения сигналов источников, расположенных в ближайшей окрестности детектора. Более подробно метод и описание эксперимента приведены в статье [Уваров и др., 2010].

Для проведения измерений был использован район с высоким уровнем сейсмичности и малым уровнем промышленных помех — геофизическая обсерватория ИКИР ДВО РАН на р. Карымшина (Камчатка), расположенная в 20 км от ближайшего населенного пункта на пересечении региональных разломов в пределах Малко-Петропавловской зоны поперечной дислокации северо-западной ориентировки у подножья экструзивного купола сопки Горя-

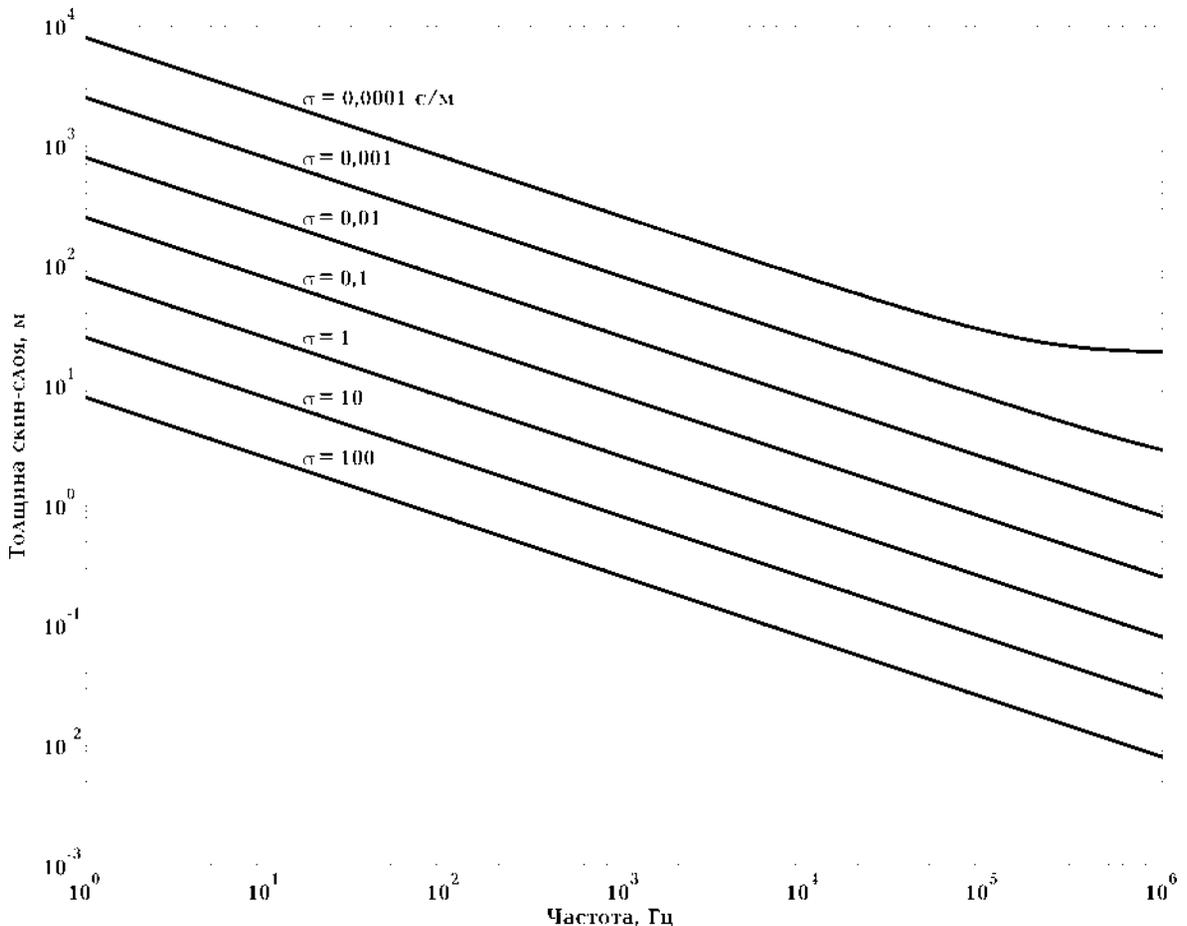


Рис. 2. Зависимость величины скин-слоя от частоты и проводимости среды.

чая. Здесь находится Паратунская раздвиговая зона. Благоприятная геолого-структурная позиция делает микросейсмические явления часто наблюдаемыми [Ворожейкина и др., 1995]. Исследования проводились в частотном диапазоне  $10 < f < 20\ 000$  Гц. Для регистрации излучения использовалась магнитная компонента. Прием осуществлялся комплексом из четырех антенн: одной квадрупольной и трех дипольных. Квадрупольная антенна выполнена в виде двух антенных рамок с эффективной площадью  $1200\text{ м}^2$  каждая, расположенных на поверхности почвы на расстоянии 25 м друг от друга и включенных встречно. Две дипольные антенны были ориентированы по сторонам света и имели эффективную площадь по  $10\ 000\text{ м}^2$ . Антенна для приема вертикальной составляющей магнитной компоненты электромагнитного поля с площадью  $1200\text{ м}^2$  располагалась на поверхности грунта горизонтально.

### 3. Сигналы литосферного происхождения.

На рис. 3 приведены фрагменты волновых форм зарегистрированных сигналов, из которых отчетливо видно, что сигналы квадрупольной антенны (Q-канал) и антенны, регистрирующей вертикальную компоненту магнит-

ного поля (Z-канал), не совпадают по времени регистрации с моментами всплесков сигнала горизонтальных компонент магнитного поля (WE- и NS-каналы).

Поскольку эти сигналы возникают в разные моменты и обладают различными пространственными свойствами, можно прийти к выводу об их разном происхождении.

Источники сигнала в Q-канале расположены на небольшом расстоянии, поскольку зона чувствительности квадрупольной антенны очень компактна (рис. 4).

На рис. 5 показаны волновые формы сигналов литосферного происхождения. Видно, что возмущения в квадрупольном канале сопровождаются мощными всплесками в дипольных каналах, имеют сложную структуру и напоминают отклик осциллятора на  $\delta$ -возмущение.

Анализ исходных данных при отсутствии априорной информации о сигналах литосферного происхождения (длительность, спектральные характеристики) не позволяет выбрать руководящие признаки для их поиска. Кроме того, достаточно большой объем исходной информации (сотни гигабайт) делает поиск аномалий в пространстве измерений неэф-

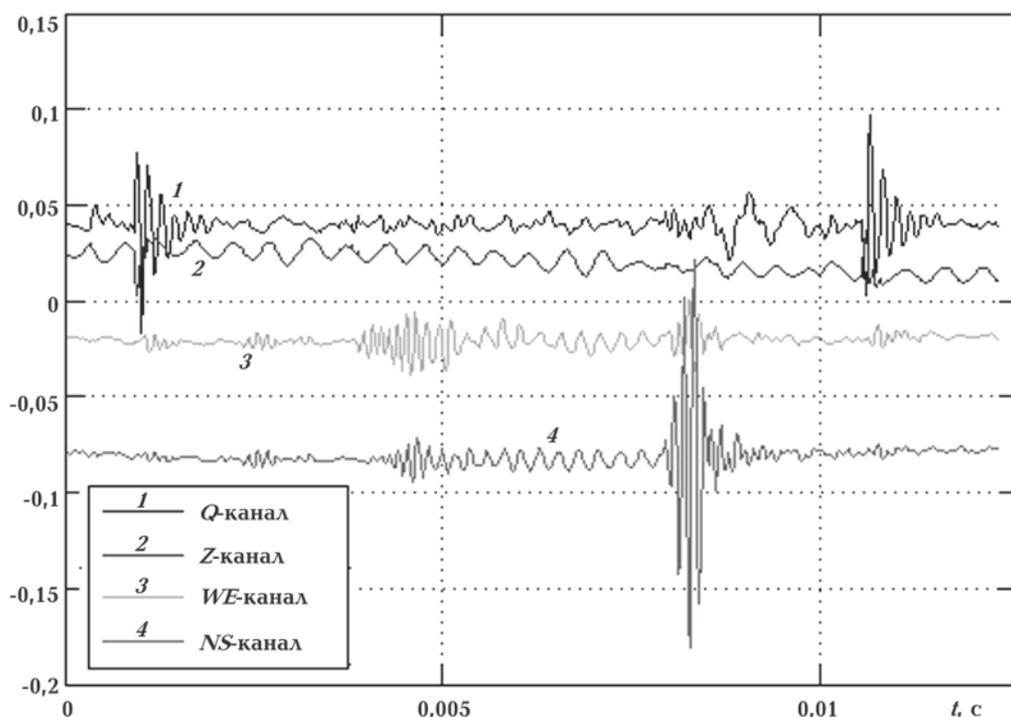


Рис. 3. Волновые формы сигналов литосферного и атмосферного происхождения.

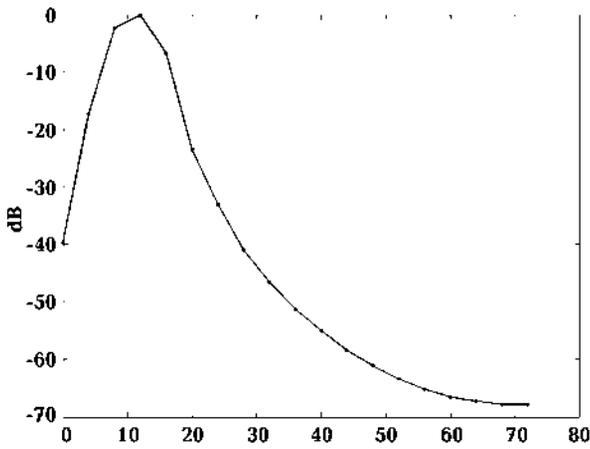


Рис. 4. Зависимость величины сигнала квадрупольной антенны от расстояния до источника.

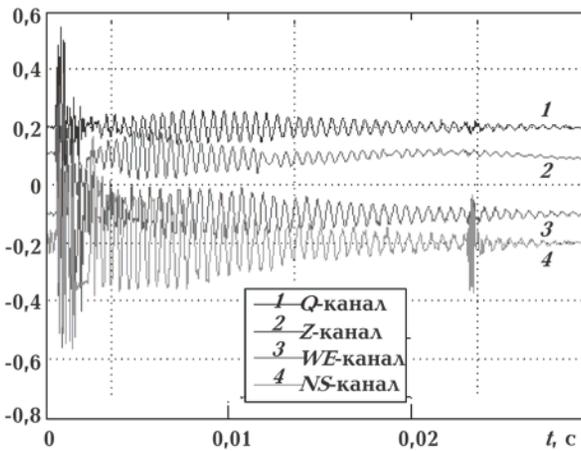


Рис. 5. Волновые формы сигналов литосферного излучения.

фективным.

Поэтому для сжатия информации с одно-временным переходом в пространство частот был выбран синхронный анализ динамических спектров всех четырех каналов. Этот метод позволяет анализировать большие объемы информации, обладает гибкостью в выборе частотного и временного разрешения.

На рис. 6 показаны спектрохронограммы фрагмента регистрации сигналов 16.07.2010 г. на станции Карымшина. Частота дискретизации 48 кГц, длительность фрагмента — 22,8 с. По горизонтальной оси отложено время в секундах. По вертикали одна над другой расположены горизонтальные полосы динамических спектров различных каналов (название соответствующего канала написано рядом).

Идентификации сигналов приведены в выносках и соединены линиями с их проявлениями в динамических спектрах. Для повышения выразительности динамические спектры нормализованы на средний спектр фрагмента. При этом устранялось мешающее влияние сигналов с неизменным во времени спектром. К таким сигналам относятся постоянные промышленные высокочастотные импульсные помехи, возникающие вследствие нелинейных эффектов в системах генерации, потребления и передачи промышленной электроэнергии (ЛЭП).

На рис. 6 проявилось влияние нестационарных высокочастотных промышленных помех. Одна из возможных причин возникновения этих процессов — нелинейное взаимодействие глобальных ионосферных токовых систем с сетями ЛЭП [Плазменная..., 2008]. Приведенный фрагмент демонстрирует спектрально-временные свойства значительного, но далеко не всего многообразия сигналов различной природы: литосферного излучения, обычных атмосфериков, свистящих атмосфериков (вистлеров — магнитосферно-каналезированных атмосфериков), шипений и хоров, глобальной навигационной системы «Альфа», нестационарной высокочастотной составляющей импульсных помех промышленной частоты. На двух нижних динамических спектрах (каналы WE и NS) мощные атмосферерики проявились в виде узких вертикальных полос. Спектрохронограмма вистлеров характеризуется саблевидной структурой. Посылки системы «Альфа» имеют вид горизонтальных пунктирных линий на частотах 11,905, 12,649 и 14,881 кГц. Следует отметить, что временной масштаб был выбран намеренно для демонстрации красивого явления — вистлеров.

Из рис. 6 видно следующее:

а) мощность излучения литосферного происхождения даже для сейсмоактивного региона, каким является Камчатка, в условиях сейсмического спокойствия составляет незначительную часть общей мощности естественного электромагнитного поля;

б) подавляющее количество сигналов естественного происхождения, в том числе литосферного, представляет собой сверхширокополосные сигналы, требующие специфического подхода при анализе [Лазаренко, Черногор, 2009].

На рис. 7 показана коллекция всплесков, содержащих проявления как в квадрупольном, так и в дипольных каналах в частотном

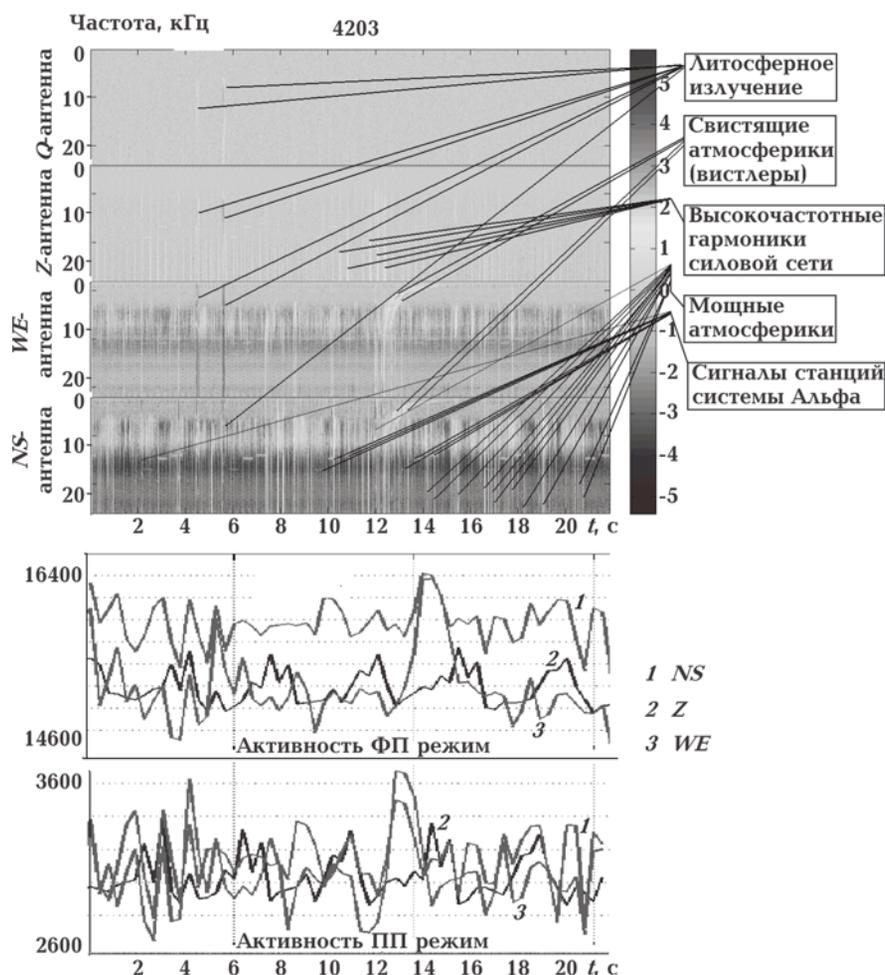


Рис. 6. Четырехканальная спектрохронограмма и сформированная из нее «активность».

диапазоне до 2000 Гц. Длительность всплесков 5—10 с. Порою можно наблюдать значительное различие в ширине всплесков на разных частотах (фрагменты 7, 9, 10, 12—15, 17, 21, 22) и более сложную частотно-временную зависимость (фрагменты 3, 17, 21). Можно предположить, что источник излучения частично расположен в зоне чувствительности квадрупольной антенны. При этом часть излучения распространяется через атмосферу, т. е. источник граничит с поверхностью грунта и имеет достаточную протяженность.

Следует отметить, что здесь представлены огибающие. При более высоком спектрально-временном разрешении всплесков обнаруживается разнообразная и сложная тонкая структура (см. рис. 5).

**4. Литосферное проявление в естественном электромагнитном излучении.** Распространение излучения над поверхностью Земли про-

исходит в атмосфере. Атмосфера обладает малыми электрическими потерями и ограничена хорошо проводящими средами: снизу — поверхностью Земли, сверху — ионосферой. С позиции радиотехники, эта структура представляет собой волновод [Альперт, 1972], нижняя граничная частота которого  $f_l = c/2h$  определяется высотой ионосферы  $h$ . При распространении поля над средой с проводящими геологическими объектами часть энергии первичного поля расходуется на возбуждение в них токов. Возникшие индукционные токи приводят к излучению вторичного поля. Результирующее поле является суммой первичного и вторичного полей. В силу смещения по фазе продольной компоненты вторичного поля результирующее поле становится эллиптически поляризованным. Электромагнитное поле, существующее в таком волноводе, в каждой точке пространства характеризуется:

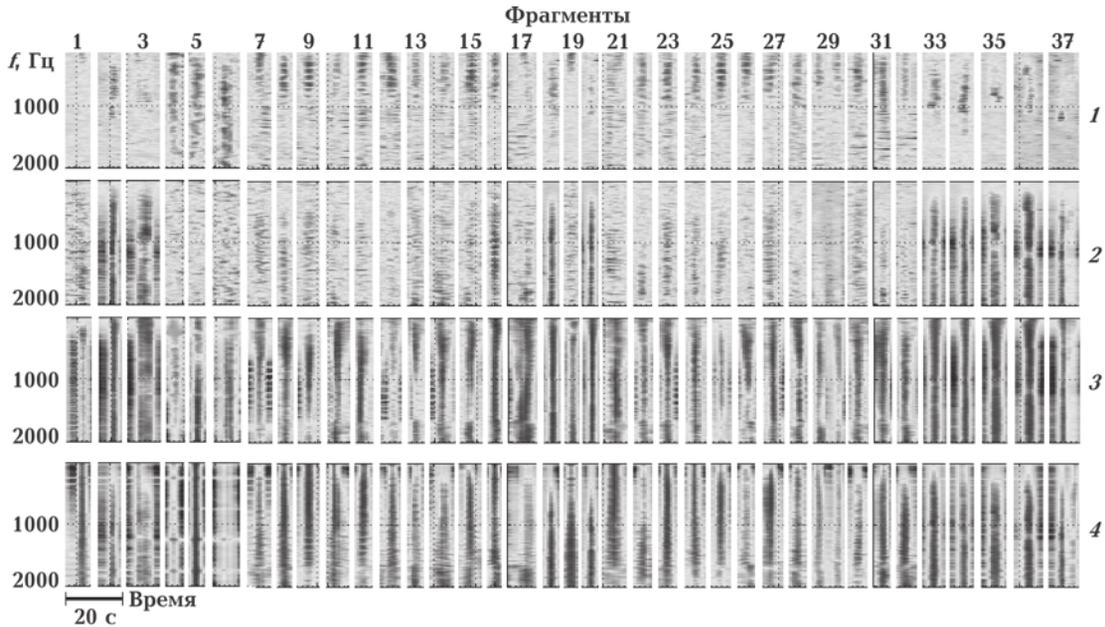


Рис. 7. Коллекция всплесков литосферного происхождения.

1) плотностью электромагнитного излучения  $W = \frac{\mathbf{E}^2 + \mathbf{H}^2}{2}$ ;

2) вектором плотности потока энергии (вектором Пойнтинга)  $\mathbf{S} = [\mathbf{E} \otimes \mathbf{H}]$ ;

3) соотношением между электрической и магнитной компонентами, которое для монохроматического поля является волновым импедансом среды; в случае плоского волновода грунт—атмосфера—ионосфера он равен отношению модулей взаимно перпендикулярных горизонтальных компонент электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей [Электроразведка, 1980; <http://davyde.nm.ru/electro.htm>]:

$$Z = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|};$$

Для первичной плоской волны, распространяющейся над поверхностью с проводящими включениями, важными характеристиками являются параметры нормированного эллипсоида поляризации результирующего поля — три главные оси (большая, средняя и малая) и их углы ориентации.

Все перечисленные выше параметры результирующего поля могут быть использованы для диагностики среды распространения.

**4.1. Метод РадиоКИП** (радиокомпарации и пеленгации) [Электроразведка, 1980; <http://davyde.nm.ru/electro.htm>] основан на регистрации электрической и магнитной компонент поля и последующем анализе импеданса —

параметра, не зависящего от типа источника.

Для случая плоских волн, распространяющихся в волноводе грунт—атмосфера—ионосфера, импеданс характеризует поверхностный слой литосферы (cite{HB89}):

$$Z = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\sigma f}}.$$

Отсюда, измерив импеданс  $Z$ , можно получить эффективную проводимость слоя грунта

$$\sigma = \frac{\mu}{2\pi f |Z|^2}$$

на частоте  $f$ .

Как первичное в данном методе используется поле мощных радиостанций длинноволнового диапазона. Однако этот подход может быть модифицирован для использования атмосфериков в качестве зондирующего сигнала электромагнитного излучения.

**4.2. Метод AFMAG** (Acoustical Frequency MAGnethism) [Электроразведка, 1980; Векслер, Спасенных, 1975; Ward, 1959; Ward et al., 1966] и ряд его клонов: ПЕМП и ПЕЭП [Электроразведка, 1980, 1989], ZТЕМ [Ward, 1959], А-ЕМ [LeSchack et al., 2011], NFIP [Gasperikova, Cuevas, 2005], AirMT [<http://www.geotech.ca>, <http://www.geotechairborne.com>], основаны на анализе параметров нормированного эллипсоида поляризации.

Локальные объекты в коренных породах (пласты повышенной и пониженной прово-

димости) вызывают изменение параметров нормированного эллипсоида поляризации результирующего поля. Эти изменения зависят от глубины залегания и геометрических параметров проводящих объектов.

Над объектами с пониженным удельным сопротивлением наблюдаются максимум горизонтальной магнитной компоненты поля, перпендикулярной к распространению  $H_\phi$ , и минимум продольной компоненты электрического поля  $E_r$ ; над высокоомными объектами — минимум  $H_\phi$  и максимум  $E_r$  [Электроразведка, 1980, 1989].

**4.3.** Существует группа методов, основанных на работах А. А. Воробьева, предположившего наличие в земной коре высоких электростатических полей, которые в результате разрядов, аналогичных молниям, создают мощные электромагнитные импульсы [Воробьев, 1972, 1975]. В дальнейшем это направление привело к появлению различающихся названиями, но практически идентичных методов (ИЕЭМПЗ, геополаритонного зондирования, спонтанной электромагнитной эмиссии, геополаритонной спектроскопии), базирующихся на регистрации и анализе усредненной бинаризованной магнитной компоненты результирующего поля [Саломатин и др., 1993; Хархалис, 1994; Чебан, 2001; Богданов и др., 2003; Богданов, Павлович, 2008; Шуман, Богданов, 2008; Богданов, 2011].

Настораживающий фактор при использовании этих методов — высокая изменчивость первичного электромагнитного поля грозовой и ионосферно-магнитосферной природы, которая неизбежно должна проявиться в виде серьезных ошибок при интерпретации результатов. Кроме того, отсутствуют данные, оценивающие эффективность указанных методов и воспроизводимость результатов измерений. Таким образом, появилась мотивация для проверки эффективности указанной группы методов.

Имеющиеся в нашем распоряжении высококачественные данные регистрации результирующего поля с высоким спектрально-временным разрешением, полученные на высокочувствительной регистрирующей аппаратуре, были использованы для моделирования различных способов дорегистрационной обработки сигнала.

Процедура предварительной обработки сигнала [Саломатин и др., 1993; Хархалис, 1994; Чебан, 2001; Богданов, 2011], выполняемая при преобразовании поля в «активность», состоит из последовательного ряда операций.

1. На антенну наводится ЭДС, которая создает в приемном контуре магнитной антенны ток

$$I = S(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})/r,$$

где  $(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})$  — скалярное произведение;  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности поля в месте расположения антенны;  $\mathbf{n}$  — вектор нормали к плоскости рамочной антенны;  $r$  — сопротивление входной цепи антенны;  $S$  — множитель, зависящий от параметров антенны.

2. Детектирование, которое описывается операцией взятия модуля  $|\cdot|$ .

3. Преобразование сигнала в бинарную форму  $H(x)$ .

Здесь  $H(x) = \begin{cases} 0, & x < p \\ 1, & x \geq p \end{cases}$  — пороговая функция ( $p$  — порог).

4. Формирование массива признаков перехода сигналом порога, выполняемое в виде модуля результатов цифрового дифференцирования пороговой функции  $|\partial H/\partial t|$ .

5. Вычисление «активности» — числа моментов перехода порога в интервале экспозиции  $A = \sum \left| \frac{\partial H(S(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})/r)}{\partial t} \right|$ .

В соответствии с этой процедурой была проведена обработка данных, ранее полученных с помощью высокочувствительной аппаратуры с высоким временным разрешением (частота дискретизации 48 кГц).

В верхней части рис. 7 показаны динамические спектры четырех каналов, а ниже — соответствующие им графики «активности». Шкала времени общая. Графики «активности» отображают содержание спектрохронограмм.

Из сравнения видно, что хотя мощные сигналы литосферного происхождения отображаются на графиках «активности», однако отличить эти сигналы от атмосфериков или вистлеров невозможно. Отметим, что фрагмент был выбран таким образом, чтобы представить возможно большее разнообразие сигналов различного происхождения. Анализ всех массивов полученных данных позволяет с определенной степенью уверенности утверждать, что частота появления атмосфериков в несколько десятков раз превосходит частоту появления литосферных сигналов. Поэтому в результатах регистрации «активности» представлены главным образом сигналы атмосферно-ионосферного происхождения.

Подчеркнем еще раз, что приведенные фрагменты данных зарегистрированы в сейс-

моактивном регионе — у основания эруптивного купола сопки Горячая, где постоянно наблюдается достаточно высокий уровень микросейсмической активности и имеются выходы термальных вод.

В сейсмически спокойных регионах рассчитывать на такой уровень электромагнитных сигналов литосферного происхождения не приходится.

Использование авианосителей для регистрации «активности» должно приводить к значительному ухудшению отношения сигнал/шум вследствие увеличения среднего расстояния от датчиков регистрирующей аппаратуры до литосферных источников.

**Результаты и выводы.** Согласно разносторонним оценкам электромагнитного излучения литосферы, обусловленным ее неравновесностью, уровень излучения литосферного происхождения на несколько порядков ниже естественного излучения грозовой природы. В связи с этим для регистрации данного излучения необходимо применять специальные методы, основанные на пространственной фильтрации сигналов литосферного происхождения.

Исследования указанных сигналов, проведенные с использованием высокочувствительной аппаратуры с высокой частотой дискретизации и пространственной фильтрацией в сейсмоактивном регионе с малым уровнем промышленных помех, свидетельствуют о большом разнообразии сигналов атмосферно-ионосферного и литосферного происхождения.

Для оценки эффективности различных усредняющих методов регистрации был создан алгоритм формирования «активности» дорегистрационной обработки метода «геополярнитонного зондирования» и ИЕЭМПЗ.

Этот алгоритм был применен при моделировании «активности».

В качестве исходного материала использованы данные регистрации естественного поля высокочувствительной аппаратурой с высокой частотой дискретизации в условиях высокой микросейсмической активности и пространственной фильтрацией.

Были выбраны фрагменты исходных данных, содержащие большое разнообразие сигналов различного происхождения.

В полученных значениях «активности» полностью утрачено различие между сигналами разной природы.

Результат моделирования приводит к выводу, что метод «геополярнитонного зондиро-

вания» не позволяет выделять сигналы литосферного происхождения.

В методах AFMAG [Ward, 1959; Ward et al., 1966; Векслер, Спасенных, 1975; Электроразведка, 1980], ПЕМП, ПЕЭП [Электроразведка, 1980; 1989], ZTEM [www.expsyn.com/assets/ESI\_Afmag\_Ztem.pdf; LeSchack, Jackson, 2006], А-ЕМ [LeSchack et al., 2011], NFIP [Gasperikova et al., 2005] и методах «геополярнитонного зондирования» и ИЕЭМПЗ используется один и тот же источник зондирующего излучения и способ приема первичного сигнала (магнитная антенна).

Однако существенно различаются методы извлечения значимой информации.

Методы «геополярнитонного зондирования» и ИЕЭМПЗ основаны на анализе осредненной бинаризации амплитуды сильно флуктуирующего результирующего поля. В свою очередь, это поле является суммой первичного поля, сформированного случайными полями грозовой и солнечно-корпускулярной природы и нестационарными полями нелинейного взаимодействия глобальных электрических токов ионосферы с сетями ЛЭП [Плазменная..., 2008], и вторичного поля, порожденного индукционными токами, наведенными первичным полем в проводящей подстилающей поверхности.

На результатах регистрации данными методами проявляется как влияние проводимости подстилающей поверхности, так и состояние естественного электромагнитного поля, зависящего от времени суток, сезона года, солнечной активности и т. д.

Таким образом, методы, основанные на анализе усредненной бинаризации амплитуды поля [Саломатин и др. 1993; Хархалис, 1994; Чебан, 2001; Богданов и др., 2003; Богданов, Павлович, 2008; Богданов, 2011], малопригодны для анализа структуры литосферы.

Метод AFMAG и его модификации основаны на анализе относительной структуры электромагнитного поля (отношение осей эллипсоида поляризации, углов наклона этих осей к горизонту), слабо зависящей от случайной природы естественного поля и определяющейся в основном свойствами подстилающей поверхности.

Методы, базирующиеся на измерении относительных параметров естественного поля (РадиоКИП, AFMAG), с гораздо большим правдоподобием позволяют восстановить структуру проводимости литосферы, чем методы, основанные на измерении абсолютных параметров поля (особенно в режиме осреднен-

ной бинаризации), поскольку относительные параметры слабо зависят от быстро и сильно

меняющейся мгновенной мощности естественного поля.

### Список литературы

- Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — Москва: Наука, 1972. — 564 с.
- Богданов Ю. А. Экспериментальные исследования собственных колебаний Земли в Антарктиде и Украине в электромагнитных излучениях // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 1. — С. 80—90.
- Богданов Ю. А., Воронин В. И., Уваров В. Н., Черняков А. М. Электромагнитное проявление структуры недр // Геофиз. журн. — 2003. — **25**, № 4. — С. 117—125.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н. Неравновесное излучение земной коры — индикатор геодинамических процессов // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 4. — С. 12—24.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия: состояние проблемы и математические модели // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 4. — С. 20—33.
- Векслер И. И., Спасенных Ю. С. Интерпретация аномалий угла наклона вектора естественного магнитного поля при картировании рудных районов // Тр. ЦНИИГРИ. — 1975. — Вып. 119. — С. 95—102.
- Воробьев А. А. Механоэлектрические явления преобразования энергии при пластической деформации твердых тел. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1972. — 93 с.
- Воробьев А. А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества. Высокие электрические поля в земных недрах. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975. — 297 с.
- Ворожейкина Л. А., Скоробогачко Л. С., Соколов В. А. и др. Опыт-методическая работа по применению геологоструктурных, гидрологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях: Отчет Авачинской партии «Камчатгеологии». О результатах работ проведенных на Петропавловской площади (п. Термальный). — ФГУ ТФИ, 1995. — 980 с.
- Гохберг Б. М., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмoeлектромагнитные явления. — Москва: Наука, 1988. — 174 с.
- Кондратьев К. Я. Радиационные факторы современных измерений глобального климата. — Ленинград: Гидрометеоздат, 1980. — 280с.
- Куклин В. М. О процессах излучения в неравновесных средах // Вісн. Харків. ун-ту. Ядра, частинки, поля. — 2010. — **4**, № 48. — С. 933.
- Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. — Харьков: ХНУ, 2009. — 576 с.
- Меньшиков Л. И. Сверхизлучение и некоторые родственные явления // Успехи физ. наук. — 1999. — **169**, вып. 2. — С. 113—154.
- Плазменная гелиогеофизика. — В 2 т. / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — Москва: Физматлит, 2008. — 672 с.
- Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. — Москва: Наука, 1966. — 404 с.
- Саломатин В. Н., Защинский Л. А., Мاستов Ш. Р. Применение метода ИЕМПЗ при комплексном изучении массивов горных пород в Крыму // Геофизические основы контроля напряжений в горных породах. — Новосибирск, 1993. — С. 27—31.
- Уваров В. Н., Дружин Г. И., Санников Д. В. Электромагнитное излучение литосферного происхождения: метод обнаружения и первые результаты // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 6. — С. 131—137.
- Физические свойства горных пород, Петрофизика. Справочник геофизика / Под ред. Н. Б. Дортман. — Москва: Недра, 1984. — 455 с.
- Хархалис Н. Р. Особенности проявления естественного импульсного излучения на оползневом склоне // Геофиз. журн. — 1994. — **16**, № 4. — С. 58—61.
- Чебан И. Д. Метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли. Некоторые аспекты применения // Геофиз. журн. — 2001. — **23**, № 4. — С. 112—212.
- Шуман В. Н., Богданов Ю. А. Импульсное электромагнитное излучение литосферы: спорные вопросы теории и полевой эксперимент // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 2. — С. 32—41.
- Электромагнитные предвестники землетрясений / Отв. ред. М. А. Садовский. — Москва, 1982.
- Электроразведка. Справочник геофизика / Под ред. А. Г. Тархова. — Москва: Недра, 1980. — 518 с.
- Электроразведка. Справочник геофизика: В 2 т. / Под ред. В. К. Хмелевского, В. М. Бондаренко. —

- 2-е изд. — Москва: Недра, 1989. — Т. 1. — 440 с.;  
— Т. 2. — 438 с.
- Atmospheric and Ionospheric electromagnetic phenomena associated with Earthquakes* / Ed. M. Hayakawa. — Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 1999. — 1000 p.
- Barr R. D., Llawlyn J., Rodger C. J.* ELF and VLF radio waves // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* — 2000. — **62**. — P. 1689—1718.
- Cohen M. B., Said R. K., Inan U. S.* Mitigation of 50—60 Hz power line interference in geophysical data // *Radio Sci.* — 2010. — **45**. — RS6002. — doi:10.1029/2010RS004420.
- Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction* / Eds M. Hayakawa, Y. Fujinawa. — Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 1994. — 622 p.
- Gasperikova E., Cuevas N. H., Morrison H. F.* Natural field induced polarization for mapping of deep mineral deposits: A field example from Arizona // *Geophysics.* — 2005. — **70**, B61. — doi:10.1190/1.2122410.
- <http://davyde.nm.ru/electro.htm>
- <http://ru.wikipedia.org/wiki/Геотермия>
- [http://www.expsyn.com/assets/ESI\\_Afmag\\_Ztem.pdf](http://www.expsyn.com/assets/ESI_Afmag_Ztem.pdf)
- <http://www.geotech.ca>
- <http://www.geotechairborne.com>
- <http://www.mining-enc.ru/g/geotermiya/>
- LeSchack L. A., Jackson J. R., Dirstein J. K., Ghazar W. B., Ionkina N.* Update 2010: Airborne Transient Pulse Surveys for Hydrocarbon Exploration—Major Recent Improvements // Abstract AAPG International Conference and Exhibition, Calgary, Alberta, September 12—15, 2010. — 2011. — <http://www.pinemontgroup.com>
- LeSchack L. A., Jackson J. R.* Airborne Measurement of Transient Pulses Locates Hydrocarbon Reservoirs // Abstract AAPG Annual Convention, April 9—12, 2006; Houston, Texas. — 2010.
- Trenberth E. K., Fasullo J. T., Kiehl J.* Earth's global energy budget / *Bul. Amer. Meteorol. Soc.* — 2009. — **90**. — P. 311—323.
- Varley C. F.* Subterranean electrical disturbances // *Nature.* — 1871. — **3**, № 77. — P. 492—496.
- Ward S. H.* AFMAG-airborne and ground // *Geophysics.* — 1959. — № 4. — P. 761—787.
- Ward S. H., O'Donnell J., Rivera R., Ware G. H., Fraser D. C.* AFMAG: applications and limitations // *Geophysics.* — 1966. — **31**, № 3. — P. 576—605. — doi: 10.1190/1.1439795.