

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ НА БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ БАССЕЙНА РЕКИ ПАРАТУНКА.

В.Н. Уваров, Г.И. Дружин, Е.И. Малкин, Д.В. Санников, В.М. Пухов

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с.Паратунка,
Камчатского края. drug@ikir.ru*

Введение

Сопутствующие землетрясению акустические и электромагнитные сигналы литосферного происхождения обычно ассоциируют с процессами релаксации тектонических напряжений [4]. Акусто-электромагнитная деформационно индуцированная эмиссия представляет собой проявление процессов релаксации напряжений в акустическом и электромагнитном полях [12]. Это обстоятельство используется при неразрушающем контроле для извлечения дополнительной информации о среде распространения и источниках [13, 14]. Геофизические аспекты этого явления пока мало изучены.

Электромагнитное излучение литосферы наблюдается на фоне мощного излучения атмосферно-магнитосферного происхождения. Оценки показывают, что атмосферно-магнитосферное излучение несравненно сильнее литосферного [7], поэтому для исследования этого излучения необходимо применение специальных методов. Разработка таких методов [5, 6] позволила начать целенаправленное исследование электромагнитного излучения литосферного происхождения.

Дополнительным чрезвычайно важным обстоятельством, усложняющим исследование волновых процессов коры с поверхности, является сильное затухание как акустического, так и электромагнитного излучений в рыхлом приповерхностном слое водно-ледникового или эолового происхождения. В самом деле, при распространении волн любой природы в изотропной однородной среде доля прошедшего расстояние r излучения определяется экспоненциальным законом Ламберта-Бугера-Бэра $\frac{J(r)}{J_0} = \exp(-\kappa r)$. Здесь коэффициент пропускания κ является

мерой неоднородности среды и не зависит от расстояния. В геологии мерой неоднородности породы, связанной с содержанием флюидов, является пористость, которая зависит от глубины и может в характеризовать распространение волновых полей. При исследованиях пористости на больших массивах однородных пород был установлен закон Ати [9, 10], указывающий на экспоненциальную зависимость пористости с глубиной:

$$p \sim \exp(-\alpha H) \quad (1).$$

Если предположить, что коэффициент пропускания среды с глубиной ведет себя аналогичным образом: $\kappa \sim \exp(-\alpha H)$, то поглощение с ростом глубины уменьшается гораздо быстрее, чем по экспоненте:

$$\frac{J(r)}{J_0} \sim \exp(-r * F(\exp(-\alpha H))). \quad (2)$$

Иными словами, с приближением к поверхности происходит чрезвычайно сильное ухудшение условий распространения. Значит, для эффективных исследований волновых полей литосферы необходим доступ к подповерхностным слоям коры, которые обеспечивают возможность распространения волн на большое расстояние. Такой доступ возможен в рудниках, шахтах или с помощью скважин. Использование скважин предпочтительно, поскольку они многочисленны, охватывают большие территории и разнообразные геологические условия.

Получен ряд интересных данных о взаимосвязи электромагнитного и акустического излучений с сейсмической активностью, влиянием погодных и сезонных условий, естественного электромагнитного поля земли [1, 11]. В этих исследованиях скважина рассматривается как средство доставки датчиков в недра и не учитываются ее радиофизические свойства. Однако учет радиофизических свойств может значительно повысить эффективность исследований.

Скважина – это отверстие, пробуренное в породе с целью изучения геологической структуры или добычи ископаемого флюида. Глубина скважин – от нескольких метров до нескольких километров. Для предотвращения обрушения грунта выполняется укрепление стенок цементацией или обсадной трубой. Мы рассматриваем только водонаполненные скважины,

Акустические свойства скважины

Частота колебаний водяного столба скважины, как частота собственных колебаний стержня f , определяется выражением:

$$f = \frac{c(2n-1)}{2h} \quad (3)$$

Разность частот между соседними гармониками дается соотношением:

$$\Delta f = c/h.$$

Здесь c – скорость звука в скважинной среде (в воде $c=1500$ м/с), n – целое число (номер гармоники), h – длина стержня. Например, для скважины глубиной 1.5 км первой гармонике водяного столба соответствует частота 0.5 Гц, а разность между гармониками – 1 Гц.

В воде, заполняющей полость скважины, распространяются только продольные волны, для которых она представляет собой волновод. Это обстоятельство позволяет с помощью датчиков в устье скважины регистрировать волны, распространяющиеся из забоя.

Поскольку боковая поверхность скважины представляет собой границу раздела двух сред – скважинной жидкости и горной породы, в скважине присутствуют условия для возникновения различных поверхностных волн (Рэлея, Стоунли, Лява, Лэмба) [3]. Наиболее существенными являются волны Лэмба. Спектр частот Лэмба для скважины определяется выражением:

$$f = \frac{c(2n-1)}{2h\sqrt{1 + \frac{\delta_l c^2}{\delta_s v_s^2}}} < f_L \quad (4)$$

Здесь δ_l , δ_s – плотность жидкости в скважине и окружающей породе, c , v_s – скорости распространения упругих колебаний жидкости и поперечных колебаний породы. Эти волны отличаются от собственных колебаний водяного столба тем, что учитывается механическое взаимодействие жидкости с ограничивающими ее стенками. Волны Лэмба существуют в

диапазоне частот ниже критической $f_L > f$, определяющейся выражением $f_L = \frac{v_s}{\pi D}$, где D –

диаметр скважины. Для наших скважин эта частота лежит в области одного – нескольких килогерц.

Продольные колебания в скважине могут возбуждаться вертикальной составляющей смещения как продольных, так и поперечных волн. Поэтому датчик, установленный в устье скважины, позволяет регистрировать вертикальную составляющую поперечных и продольных колебаний разных слоев горной породы. Достаточно глубокая скважина пересекает несколько различных литологических слоев, каждый из которых характеризуется своими упругими константами. Все слои породы, особенно приповерхностные, обладают гораздо большим поглощением, чем вода скважинной полости. В результате скважина является коллектором и волноводом акустических колебаний всех слоев – она собирает колебания различных слоев недр и выводит их на поверхность, позволяя миновать сильно поглощающие приповерхностные слои.

Электромагнитные свойства скважины

Обычно скважина во избежание обрушения полости в процессе эксплуатации обсажена стальной трубой. Поэтому электромагнитные свойства скважины в значительной мере обусловлены тем, что обсадная труба скважины представляет собой проводник в плохо проводящей среде и ее можно рассматривать как антенну в диэлектрической среде с потерями. [2]. Регистрация электрической составляющей поля осуществляется путем измерения тока поляризации, возникающего в проводнике под влиянием электромагнитного поля. Однако на него будет воздействовать достаточно сильное поле атмосферно-грозового происхождения, отфильтровать которое от сигналов литосферного происхождения представляет значительную проблему. Гораздо больше возможностей имеется при регистрации магнитной составляющей электромагнитного поля недр. Стальная обсадная труба является магнитопроводом, позволяющим извлекать магнитную составляющую поля на поверхность. Поэтому использование магнитной антенны с обсадной трубой в качестве сердечника – достаточно эффективное решение для регистрации вертикально направленной компоненты магнитной составляющей поля недр. Безусловно, следует обратить внимание на использование эффекта магнитоупругости (эффект Виллари) [8], когда механическое напряжение приводит к изменению степени упорядоченности доменной структуры и в катушке индуктивности возникает ток.

Таким образом, скважина представляет собой:

- a. волновод продольных акустических и электромагнитных колебаний;
- b. преобразователь поперечных электромагнитных и акустических колебаний в продольные колебания;
- c. коллектор акустических и электромагнитных продольных колебаний толщи недр,
- d. резонансную структуру;
- e. преобразователь акустических колебаний в электромагнитные;
- f. кроме того, стальная обсадная труба представляет собой магнитопровод, выводящий глубинные магнитные поля на поверхность.

Эксперимент

На буровой скважине 74 на ручье Коркина в бассейне реки Паратунка (Южная Камчатка) был поставлен полевой эксперимент. Эта скважина была пробурена в 1968 г. до глубины 649 м. Скважина находится в зоне субширотного левосдвигового разлома на пересечении с Северо-Западной трансформной зоной. Здесь же проходит зона центрального планетарного разлома СВ 20°, т.е. имеет место зона сопряжения разломов (зона «раскрытия» СВ 50°, субпараллельная зоне субдукции Курило-Камчатского желоба). Анализ структуры породы слагающей толщи позволяет предположить, что основные источники излучения могут располагаться на глубинах 120 – 650 м. Характерная длина распространения акустического излучения в диапазоне 10 – 100 Гц в породах на этой глубине может находиться в пределах 100 – 10 000 м.

Регистрация акустического поля осуществлялась гидрофоном, оснащенный предварительным усилителем и погруженным в скважинную воду на глубину около 1 м. Регистрировалась вертикальная составляющая магнитной компоненты. Слабые сигналы литосферного происхождения выделялись из мощного фона помех атмосферно магнитосферного происхождения компенсационным методом [6, 5]. Для этого использовались две магнитные антенны. Одна из них - для регистрации смеси электромагнитного сигнала литосферы и атмосферного шума, другая – только шума. Усредненные спектры исходных электромагнитных сигналов (смеси и помехи) сигнала приведены на рис. 1. Из этого рисунка видно, что простое использование разности сигналов не приводит к полному устранению помех, хотя и существенно подавляет атмосферные. Гораздо лучшие результаты дает устранение помех вычитанием из смеси среднего взвешенного значения шума

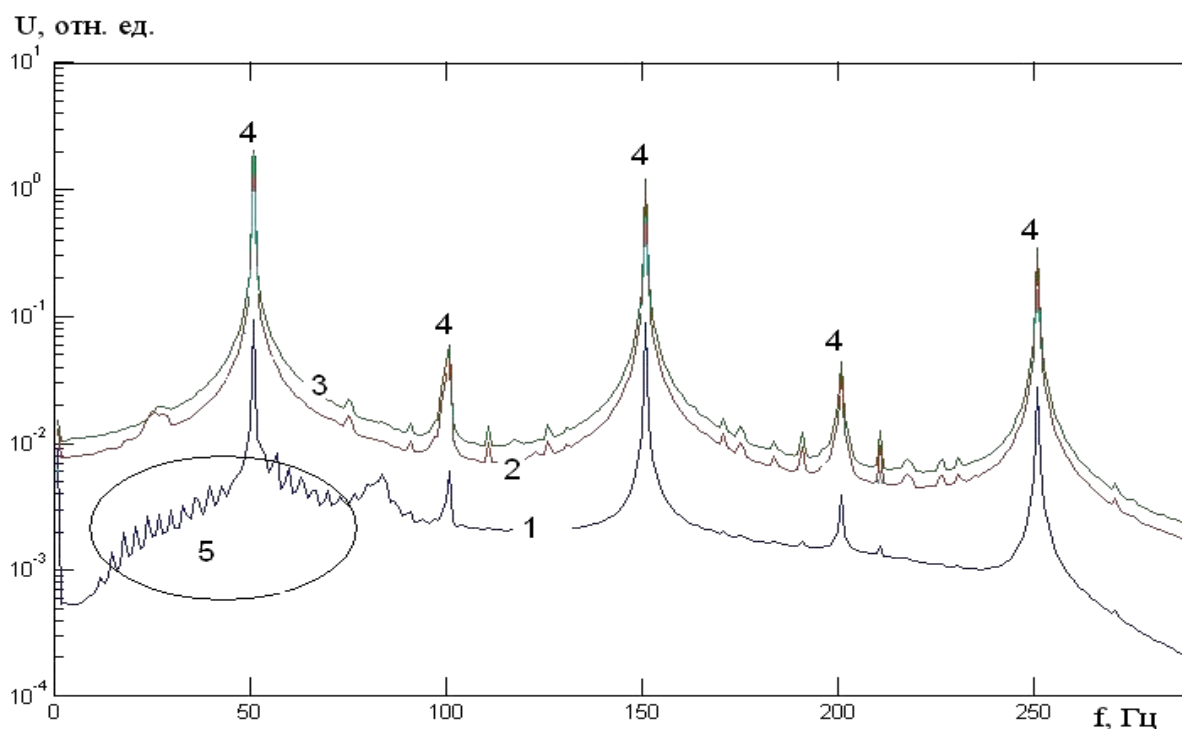


Рис.1. Усредненные спектры исходных сигналов.

1 - спектр акустического сигнала; 2 – спектр шумового сигнала; 3 – спектр сигнала смеси; 4 - частоты промышленных помех; 5 – акустические резонансы скважины.

Анализ данных

Использование дифференциального метода анализа электромагнитного излучения позволило сильно подавить помехи грозового и техногенного происхождения и выделить проявление литосферных процессов. В акустических излучениях присутствует модовая структура собственных колебаний скважины, которая видна на рис. 1 (отмечена эллипсом), и в верхней части рис. 2.

В дальнейшем для волновых проявлений литосферных процессов введен термин «литосферик». Наиболее ярко литосферрики выделяются на динамических спектрах: в виде диффузных пятен, одной или нескольких спектральных гармоник, равномерно или случайно меняющихся со временем линий. В записях исходных данных мощным литосферикам соответствует цуги длительностью 1 – 4 минуты с амплитудой в 5 – 20 раз превышающей фоновое значение.

Были выделены два класса отличающихся характером спектров литосфериков – линейчатым и диффузным. В свою очередь, среди литосфериков с линейчатым спектром можно выделить литосферрики с единственной спектральной гармоникой (далее - «моносигмоида») (рис 2-1), несколькими спектральными гармониками, («полисигмоида») (рис 2-2) и литосферрики с монохроматическим случайно меняющимся спектром («трель») (рис 2-3).

Ниже представлено более подробное описание спектров литосфериков.

Один из наиболее интересных типов литосфериков – это «моносигмоиды» - рис 2-1. Их длительность - 3 – 4 минуты. Диапазон частот – 70 ÷ 100 Гц. Этот тип литосфериков имеет псевдомонохроматический спектр. Единственная спектральная линия литосферика стартует на частоте около 100 Гц. Ее частота уменьшается со временем. Литосферик достигает максимума интенсивности спустя минуту после старта вблизи 80 Гц и завершается через 2-3 минуты после максимума на частоте около 70 Гц. Максимальное значение интенсивности может превосходить фоновое значение в 15 – 20 раз. Изменение частоты литосферика со временем очень напоминает эффект Доплера от движущегося мимо источника. При скорости звука в среде горной породы 3000 м/с это соответствует движению со скоростью около 300 м/с. В естественных условиях в среде горной породы подобная скорость движения материальных тел невозможна. Однако вполне возможны подобные скорости для процессов, например, при распространении переднего фронта трещины. Асимметрия формы «моносигмоиды» относительно максимального значения сигнала, указывает на то, что длительность развития процесса в 2 раза меньше времени полного затухания.

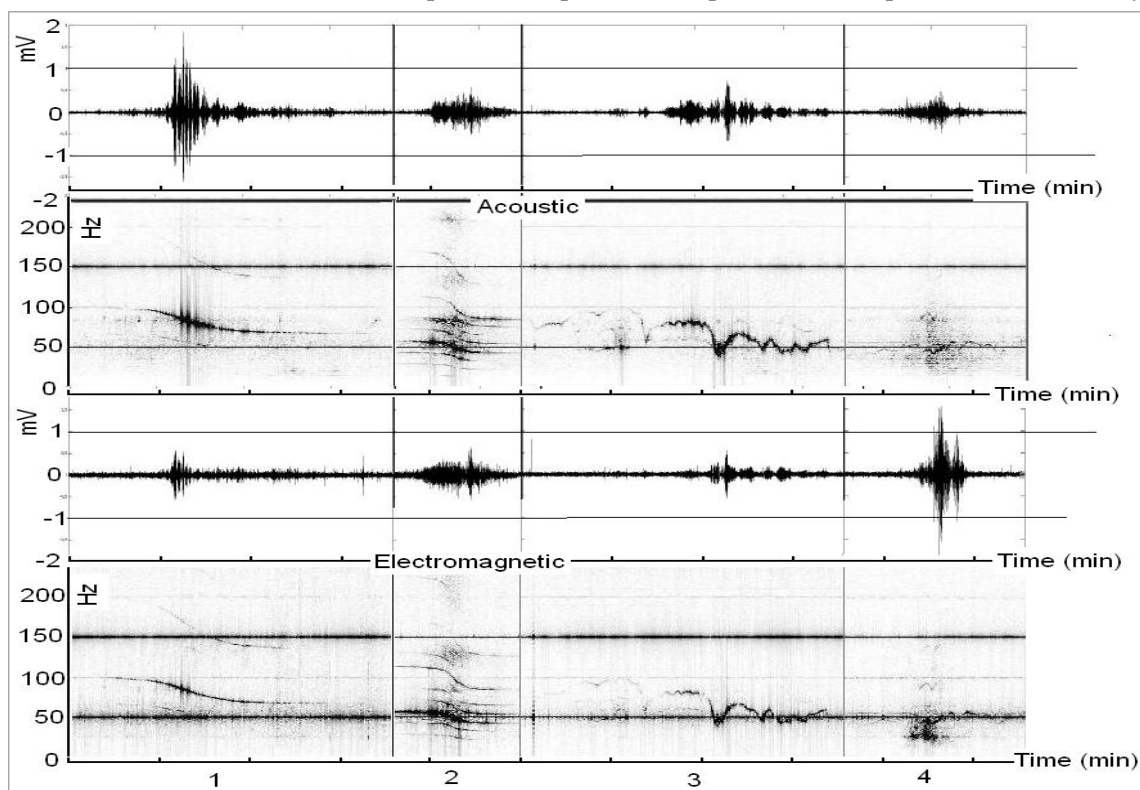


Рис. 2. Примеры anomalously мощных литосферных сигналов и их динамических спектров 1 - «моносигмоида», 2 - «полисигмоида», 3 - «трель», 4 - «гул».

«Полисигмоиды» представлены на рисунке 2-2. Это литосферик с линейчатым спектром. Его продолжительность - 3-4 минуты. Его спектр представляет собой набор синхронных гармоник-моносигмоид, смещенных по частоте на 29 Гц. Как и для моносигмоид, происходит смещение частоты гармоник со временем в область нижних частот. Конечное изменение частоты гармоник пропорционально средней частоте спектральной компоненты.

Литосферик «Трель» представлен на рисунке 2-3, обладает малой интенсивностью и линейчатым спектром, характеризуется случайно меняющейся частотой. Длительность – 1 – 2 минуты. Диапазон частот – 50 – 80 Гц. В волновых формах этот тип аномалий практически не проявляется.

На рисунке 2-4 представлена спектрохронограмма литосферика типа «гул». Этот литосферик характеризуется спектром диффузного типа и по амплитуде волновой формы превосходит фоновое значение в 6 – 10 раз. Проявляется в основном на частотах в диапазоне 20 – 40 Гц, имеет длительность 1-2 минуты. Часто наблюдаются серии таких аномалий, следующих одна за другой.

Аномалии со спектром линейчатого типа могут накладываться на аномалии диффузного типа.

Выводы

В работе дано краткое описание радиофизических свойств скважины, учет которых повышает эффективность исследований.

Результаты регистрации акусто-электромагнитного излучения, выполненные на скважине в сейсмоактивном районе, показали наличие аномально-высоких уровней сигналов, превосходящих фоновое значение в 10-20 раз.

Наблюдаемые аномалии как акустического, так и электромагнитного излучения имеют литосферное происхождение и связаны с релаксацией тектонических напряжений.

Выделены четыре основных типа аномалий акусто-электромагнитного излучения, соответствующих сдвиговой и объемной релаксации тектонических напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-01159

Список литературы

1. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В. Основные свойства геоакустической эмиссии по результатам наблюдений в глубокой скважине Г-1 //Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 2003. С. 44-47.
2. Кинг Р., Смит Г., Антенны в материальных средах. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984г.
3. Скважинная и шахтная геофизика: Справочник геофизика. Т2, М: Недра, 1988г, 440 с.
4. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – Наука., 2003, 270 с. ISBN 5-02-002832-0
5. Уваров В.Н., Дружин Г.И., Санников Д.В. Электромагнитное излучение литосферного происхождения. Метод обнаружения и первые результаты, ПТЭ, 2010, №6, С. 131-137
6. Уваров В.Н. и др. Способ пассивной локации близко расположенных источников электромагнитного излучения на фоне мощных излучений удаленных источников. Патент Российской Федерации № 2473101, 30.06.2011
7. Уваров В.Н. Электромагнитное проявление литосферы в СНЧ-ОНЧ диапазоне. Геофизический журнал, №6, т.34, 2012, С. 133-146.
8. Физическая энциклопедия, Т1. М: Советская энциклопедия, 1988.
9. Athy L.F., 1930. Density, porosity and compactation of sedimentary rocks, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. v. 14, pp. 1-24.
10. Borehole and shaft Geophysics Скважинная и шахтная геофизика: Справочник геофизика. Т2, М: Недра, 1988г, 440 р.
11. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabini G.V., and Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks. RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES, VOL. 13, ES1002, doi:10.2205/2013ES000527, 2013.
12. Hadjicontis V., C. Mavromatou C., Antsygina T. N., Chishko K. A. Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals. Phys.Rev.B V76, N2, 024106 (15)(2007).
13. Mori Y., Obata Y., and Sikula J. Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock sample under deformation, J. Acoustic Emission, 27, 2009. pp. 157-166.
14. Sikula J., Mori Y., Lokajicek T., Koptavy P., Majzner J. and Sedlak P., Crack creation kinetics characterization by electromagnetic and acoustic emission. Proc.28th European Conf. AE Testing, Kracov, Poland, September 2008, pp. 118-123.