

УДК 550.348

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ РАЗНОГО ТИПА В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ И МЕТОДЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА

© 2011 г. Л.Л. Худзинский

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Кратко перечислены некоторые результаты, полученные с использованием магнитоупругих геофонов при изучении природы и особенностей подземного фонового звука. Регистрация велась, как правило, с аппаратурно-программным осреднением сигналов на интервале в одну минуту и последующим сглаживанием на более протяженных отрезках времени. Выполнялся анализ вариаций амплитуды подземного фонового звука и дискретный частотный анализ данных, получаемых на выходах четырех аналоговых полосовых фильтров.

При сопоставлении частотных характеристик и переходных функций магнитоупругих геофонов и электродинамических сейсмоприемников сделан вывод о предпочтительном использовании последних для целей поляризационного анализа; обоснованы некоторые ограничения на применение магнитоупругих геофонов и определены возможные пути их модернизации.

Ключевые слова: магнитоупругие геофоны, электродинамические сейсмоприемники, частотные характеристики, переходные функции, поляризационный анализ.

Введение

Теоретические основы, конструктивные особенности и методические возможности датчиков сейсмоакустических колебаний – магнитоупругих геофонов – рассмотрены в целом ряде статей (см., например, [Беляков, 2000; Беляков и др., 2002]). Продуманная конструкция и качественное исполнение приборов обеспечивает их длительную надежную работу. Главное преимущество подобных преобразователей состоит в том, что величина выходного сигнала при постоянном механическом смещении пропорциональна кубу частоты [Беляков, 1993]. Это, в свою очередь, при низком уровне собственных шумов позволяет на высоких частотах существенно повышать чувствительность геофонов при широком динамическом диапазоне – для МАГ-36 до $0.01 \text{ мВс}^3\text{м}^{-1}$; для МАГ-2.63 до $0.1 \text{ мВс}^3\text{м}^{-1}$; для МАГ-120П до $1 \text{ мВс}^3\text{м}^{-1}$ [Беляков, 2004].

В последние годы практическое использование обладающих уникальными особенностями магнитоупругих преобразователей позволило получить новые интересные результаты, например, выявить и проанализировать корреляционную связь между вариациями амплитуды сейсмоакустической эмиссии в различных частотных диапазонах и приливными деформациями [Беляков и др., 1999]; разработать энергетическую модель подземного фонового звука, который является следствием теллурических процессов и несет независимую информацию об изменении напряженного состояния земной коры, пригодную для прогноза землетрясений [Беляков и др., 2002]. Предложенная авторами работы [Беляков, Лавров, Николаев, 2008] приливная модель, учитывающая лунные и солнечные деформационные процессы и использующая вместо григорианского календаря лунный со средним периодом 28 суток, дала возможность обнаружить причинно-следственную связь между гравитационными силами и землетрясениями различного масштаба.

В работе [Беляков, 2009] приводится обзор основных результатов использования записей вариаций осредненных амплитуд, полученных с помощью магнитоупругих датчиков. В ней кратко освещены особенности вариаций в глубокой скважине в Припятском прогибе, увязанные с лунной и солнечной компонентами приливных деформаций, а также описаны наблюдения в центральной части Москвы, где в условиях сильных промышленных помех (четыре линии метрополитена, интенсивное движение транспорта) в июне 1998 г. за четверо суток до урагана были зарегистрированы регулярно возникающие рои всплесков возрастающей интенсивности сейсмоакустической эмиссии. После прохождения урагана подобные всплески фиксировались еще в течение нескольких суток. В ночь на 17 февраля 1998 г. во время перерыва в работе московского метро был зафиксирован всплеск сейсмоакустической эмиссии, по времени совпавший с прохождением волн от землетрясения в северо-восточной части Атлантического океана, зарегистрированных на сейсмостанции “Москва”. Наибольшее внимание в названной работе уделено задачам, связанным с прогнозом землетрясений и вулканических извержений; приводятся положительные результаты, полученные на Камчатке, в Припятском прогибе, Японии.

В метрологическом плане некоторым ограничением использования разработанных геофонов является определенная неидентичность вертикальной и горизонтальных компонент: в магнитоупругом преобразователе, описываемом в [Беляков, 1993, с. 110], частота механического резонанса для горизонтальных компонент не превышает 200 Гц, а для вертикальной компоненты ее значение около 2000 Гц. В другой работе того же автора [Беляков, 2000] достаточно подробно описаны теоретические основы и история разработки магнитоупругих геофонов, приведены данные о “громдном”, по выражению автора, динамическом диапазоне (220–260 дБ), достигаемом благодаря низкому уровню собственных шумов и кубической амплитудно-частотной характеристике. Автором рассматриваются некоторые геофизические задачи, которые могут быть успешно решены при использовании наземных и скважинных магнитоупругих геофонов. Отмечена возможность построения антенных устройств, позволяющих определять “не только азимут распространения колебаний, но и направление на источник этих колебаний”; несколько раз упоминается о широкой полосе продольной компоненты. На с. 41 названной работы говорится о неоправданности увеличения частоты механического резонанса горизонтальных компонент выше 250 Гц, которое может быть достигнуто за счет повышения жесткости преобразователя при одновременном уменьшении чувствительности. В работе [Беляков, 2004] обращается внимание на то, что частота резонанса горизонтальных компонент трехкомпонентного геофона МАГ-3СМ примерно в три раза выше частоты резонанса близкого по конструкции геофона МАГ-3С; однако конкретных количественных данных (в Гц) для горизонтальных и вертикальных компонент автор не приводит.

Методические ограничения

Упомянутые результаты, как и другие, получаемые в ходе продолжающихся исследований, основаны только на анализе осредненных амплитуд сейсмоакустической эмиссии, в основном, при трехкомпонентной регистрации (в четырех третьоктавных полосах частот). Однако известно, что поляризационные характеристики колебаний весьма чувствительны к изменениям динамических и структурных параметров среды (см., например, [Гальперин, 1977; Худзинский, 1990]). Отметим, что продетектированные, осредненные и сглаженные сигналы, используемые в рассматриваемом аппаратурно-программном комплексе, мало информативны для поляризационного анализа. По исходным записям горизонтальных компонент резко вступающих первых волн азимут

направления их подхода можно однозначно определить в диапазоне от 0° до 360° ; в последующих вступлениях этот диапазон сужается до 180° . Если же на обеих компонентах (X , Y) сигнал всегда положителен, как это имеет место после детектирования, то вычисленные значения угла всегда будут находиться в первой четверти, а при осреднении на большом интервале (1 мин и более) – в существенно более узком диапазоне, что практически исключает возможность использования поляризационного анализа в данном варианте сейсмоакустического мониторинга.

При разработке и практическом применении метода поляризационного анализа в сейморазведочном диапазоне частот В.П. Рудницким [1966], Е.И. Гальпериным [1970], Г.А. Шехтманом [1973], Ю.Д. Мирзояном [1979] и другими исследователями, как правило, использовались электродинамические сейсмоприемники. Повысить разрешающую способность метода, в принципе, можно за счет расширения диапазона или перехода в более высокочастотную область. С этих позиций интересно рассмотреть возможности магнитоупругих преобразователей, обладающих значительно более широким динамическим диапазоном и резким повышением чувствительности при возрастании частоты (см., например, [Беляков, 1993, 2004]). Для оценки такой возможности были экспериментально сняты частотные характеристики при синусоидальном механическом возбуждении первичных преобразователей в широком диапазоне, а также записаны переходные процессы при их импульсном возбуждении. В принципе, можно было бы ограничиться и одной процедурой, так как комплексная частотная характеристика и переходная функция однозначно связаны между собой [Харкевич, 1957]. Обе процедуры были выполнены для большей наглядности и уверенности в надежности результатов.

Одна из основных задач поляризационного анализа – определение направления на импульсный или квазистационарный источник колебаний – может решаться либо в горизонтальной плоскости, когда используются две компоненты (X , Y) и определяется только азимут подхода, либо в трехмерном пространстве с использованием трех ортогональных компонент (X , Y , Z), позволяющих определять полный вектор смещения (скорость, ускорение). Для предварительной оценки результатов и перспектив развития метода на начальном этапе представляется достаточным исследование горизонтальных компонент зонда ПСАК и двухкомпонентной установки из сейсмоприемников СГ-10 при горизонтальном возбуждении под разными азимутами.

Частотные характеристики

Гармоническое возбуждение двухкомпонентной установки из сейсмоприемников СГ-10 и зонда ПСАК осуществлялось с использованием электродинамического сейсмоприемника СПМ-16м по схеме, предложенной И.И. Гурвичем [1960], когда на одну из катушек подается синусоидальный сигнал, а со второй снимается напряжение, пропорциональное скорости смещения подвижной системы. При этом возможны два варианта работы. В первом амплитуда входного сигнала меняется в зависимости от частоты так, чтобы во всем рабочем диапазоне обеспечивался постоянный уровень смещения или скорости смещения подвижной системы. Во втором варианте на катушку возбуждения подается синусоидальный сигнал постоянной амплитуды во всем частотном диапазоне, а напряжение, снимаемое с другой катушки, используется в качестве контрольного. С точки зрения надежности измерения первый вариант предпочтительнее. Следует также отметить, что в СПМ-16м, благодаря вытянутой в осевом направлении подвижной системе и симметричности расположения масс и упругих элементов подвески, обеспечивается лишь одна степень свободы и существенно снижаются побочные (паразитные) резонансы [Справочник..., 1966]. Для снятия частотных характеристик использовалась специально написанная автором программа `afc8zond.c`, позволяющая работать в диалоговом режиме.

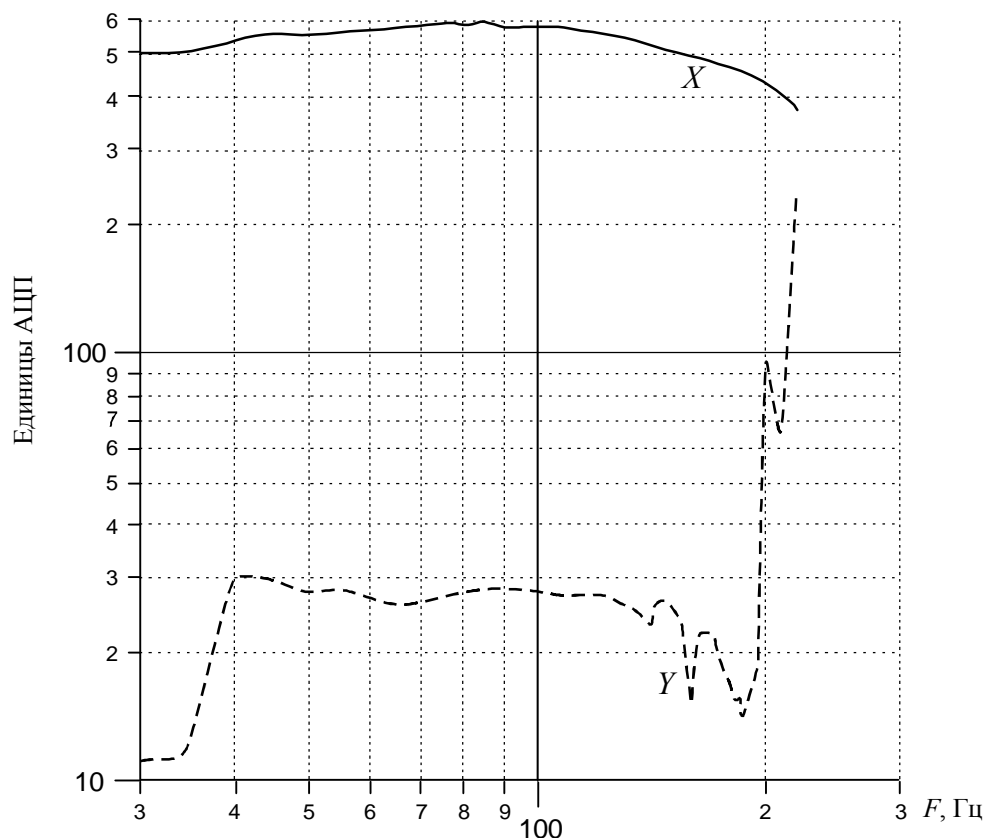


Рис. 1. Частотные характеристики горизонтальных компонент двухкомпонентной установки СГ-10, снятые при постоянной скорости возбуждения. Сплошная линия – X -компонента; штриховая – Y -компонента

Сейсмоприемник СПМ-16м крепился на горизонтальную установку так, что угол между его осью и X -компонентой составлял 2° ; это практически не влияло на условия возбуждения сейсмоприемника. При этом Y -компонента на всех частотах получала несущественное возбуждение, которое, тем не менее, позволяло контролировать ее работоспособность. Величина возбуждающего синусоидального напряжения устанавливалась так, чтобы во всем изучаемом диапазоне частот амплитуда скорости механического воздействия оставалась постоянной. Такой подход практически всегда используется в сейсмических методах разведки.

Частотные характеристики двух компонент сейсмоприемника СГ-10, снятые в диапазоне от 30 до 220 Гц, приведены на рис. 1. В интервале от 30 до 140 Гц чувствительность X -компоненты менялась мало – отклонения составляли не более $\pm 10\%$; для Y -компоненты начиная с 130 Гц стали проявляться локальные неоднородности; на частотах 200 и 210 Гц обнаружилось четко выраженные резонансы.

При снятии частотных характеристик горизонтальных X - и Y -компонент зонда ПСАК возбуждение выполнялось при постоянной амплитуде смещения (в отличие от СГ-10), так как при постоянной скорости выходной сигнал на частотах выше 600 Гц был пренебрежимо мал, в связи с чем получались нечитаемые графики. Частотные характеристики X - и Y -компонент зонда, снятые при постоянном горизонтальном смещении его корпуса, представлены на рис. 2. При частотах от 40 до 100 Гц характеристики близки к кубическим, что соответствует теоретическим представлениям [Беляков, 1993, 2004]. В интервале 100–150 Гц зависимость выходного сигнала от частоты приближается к пятой степени, что, по-видимому, объясняется наличием первого резонанса на частоте 150 Гц.

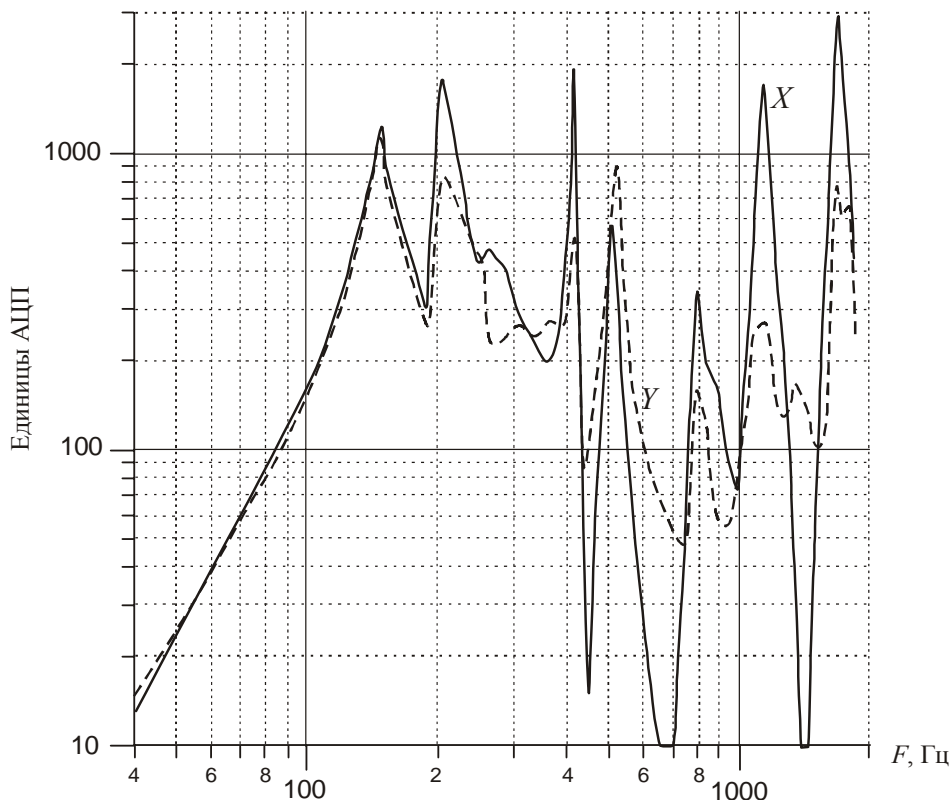


Рис. 2. Частотные характеристики горизонтальных компонент зонда ПСАК, снятые при постоянном горизонтальном смещении корпуса зонда. Сплошная линия – X -компонента; штриховая – Y -компонента

Следует подчеркнуть, что в интервале до 200 Гц частотные характеристики X - и Y -компонент практически совпадают. Далее до 2000 Гц отмечены еще шесть резонансов, которые несколько различны для X - и Y -компонент по амплитуде и форме, но совпадают по частоте.

Приведенные данные и в рабочем диапазоне горизонтальных компонент (до 200 Гц), и существенно выше позволяют говорить о достоверности выполненных измерений.

Переходные характеристики

При изучении переходных характеристик возбуждение первичных датчиков осуществлялось электродинамическим сейсмоприемником НС-4 с собственной частотой 4 Гц и сопротивлением катушки 265 Ом. Специально собранный генератор возбуждения выдавал импульсы с амплитудой 5 В при длительности 0.5 мс; выходное сопротивление генератора при прохождении импульса составляло первые единицы Ом. После прохождения импульса напряжение сбрасывалось в ноль; обмотка НС-4 практически закорачивалась, что обеспечивало медленное (в течение 200 мс) возвращение катушки в исходное состояние. Таким образом, в диапазоне частот 10–1000 Гц происходило механическое возбуждение типа ступеньки с длительностью переднего фронта 0.5 мс, а выходные сигналы изучаемых датчиков интерпретировались как переходные характеристики с достаточным основанием.

Двухкомпонентная установка СГ-10 возбуждалась в горизонтальной плоскости под разными азимутами с шагом 22.5° . Полученные переходные характеристики приведены на рис. 3 (после азимута 45° шаг составляет не 22.5° , а 45°).

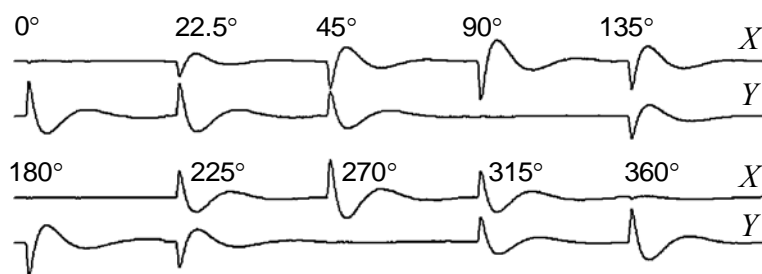


Рис. 3. Переходные характеристики горизонтальных сейсмоприемников СГ-10, снятые при возбуждении импульсами типа ступеньки с длительностью переднего фронта 0.5 мс. Цифры над кривыми – углы возбуждения по отношению к Y -компоненте

При любом азимуте возбуждения переходные характеристики имеют идентичную форму, соответствующую критическому затуханию. Взаимного влияния между каналами и паразитных колебаний при перпендикулярных воздействиях не наблюдается. При “положительном” возбуждении (импульс со стороны дна Y -компоненты СГ-10, углы 45° и 315°) записи X - и Y -компонент идентичны. При “отрицательном” возбуждении амплитуда Y -компоненты оказалась на 12% меньше амплитуды X -компоненты (углы 135° и 225°), что, возможно, связано с особенностью пружин подвески данного сейсмографа. В целом, сейсмоприемники СГ-10 отвечают требованиям метода поляризационного анализа.

Зонд ПСАК возбуждался под углами 0 , 45° и 90° по отношению к X -компоненте. Выходной сигнал X - и Y -компонент после широкополосных усилителей подавался непосредственно на входы АЦП, минуя частотные фильтры, детекторы и сглаживающие цепи, как это имело место при изучении аналоговой части сейсмоакустической аппаратуры [Беляков и др., 2007].

На рис. 4 приведены записи начальных участков переходных характеристик длительностью 60 мс от начала импульса возбуждения. В первую очередь, следует отметить сложную форму длительных переходных процессов, вызванную недостаточным затуханием собственных колебаний магнитоупругих преобразователей. К сожалению, амплитуда четвертой фазы превосходит половину амплитуды первой фазы одноименной компоненты. Кроме того, наблюдается ощутимое взаимное влияние (по-видимому, механической природы) между компонентами. Так, на X -компоненте при 0° и на Y -компоненте при 90° паразитные колебания максимальной амплитуды (порядка 10%) отмечаются с запаздыванием на 25–30 мс по отношению к импульсу возбуждения. Преобладающая частота переходных процессов на этом отрезке времени соответствует частоте резонанса 200 Гц (см. рис. 2) и значениям, приводимым в цитируемых выше работах.

Графики тех же переходных процессов на более длительном временном отрезке от 0 до 600 мс приведены на рис. 5 в масштабе, сжатом по сравнению с рис. 4. И на X -, и на Y -компонентах неожиданно обнаружили слаботухающие колебания правильной формы с частотой 85 Гц. Однако никаких искажений формы частотной характеристики (см. рис. 2) не наблюдается. Это можно объяснить тем, что характеристики снимались с дискретным шагом, причем, в этом диапазоне подавались частоты 80 и 90 Гц, и наблюдаемый очень узкий и ярко выраженный резонанс был просто пропущен. Говоря о природе обнаруженных колебаний с частотой 85 Гц, их скорее следует связывать с собственными изгибными колебаниями корпуса подвешенного зонда, а не с колебаниями магнитоупругих преобразователей. При нахождении зонда в скважинном растворе, а не в воздушной среде, этот резонанс существенно сгладится, а имеющееся прижимное устройство практически полностью его погасит [Кузнецов и др., 1993].

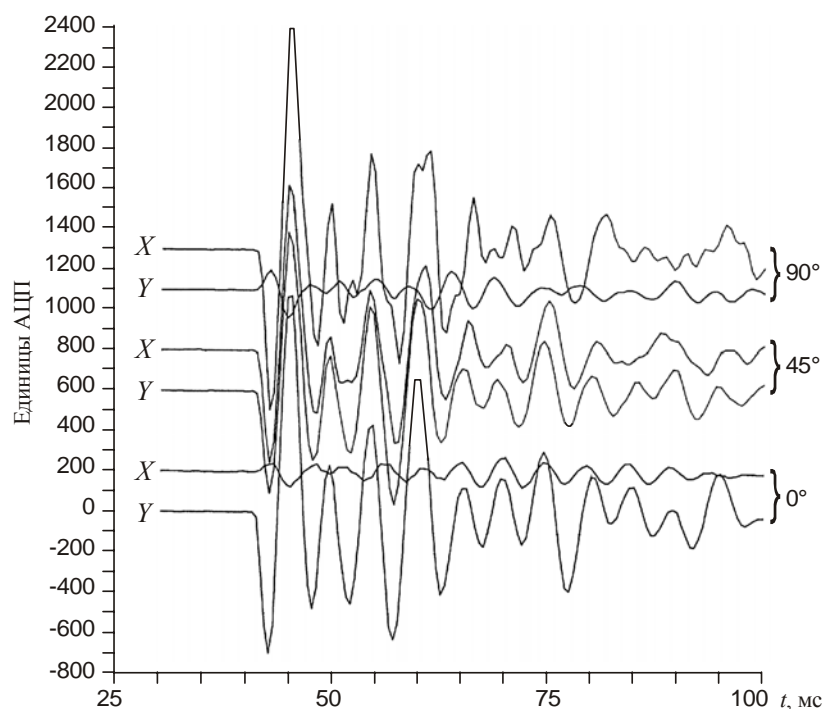


Рис. 4. Начальные участки записей переходных характеристик горизонтальных X - и Y -компонент зонда ПСАК при механическом возбуждении типа ступеньки с длительностью переднего фронта 0.5 мс. Справа указаны углы возбуждения по отношению к X -компоненте

Усложнение требований к первичным преобразователям. Обеспечение необходимых условий установки

Чтобы использовать возможности поляризационного анализа в широком диапазоне частот, все компоненты (X , Y , Z) приемного устройства должны иметь идентичные частотные (и переходные) характеристики. Добиться этого в существующих трехкомпонентных магнитоупругих преобразователях достаточно сложно. Гораздо проще использовать три идентичных датчика (три Z -преобразователя), расположив их по ортогональным осям. Правда, при этом в скважинном варианте возникнут некоторые трудности, связанные со значительным увеличением диаметра зонда даже, если вместо обычной ортогональной установки использовать V -образную.

Помимо этого, одним из известных способов (или их комбинацией) необходимо существенно повысить степень затухания собственных колебаний датчиков, сведя к минимуму длительность переходных процессов при импульсном возбуждении.

Вероятно, наиболее благоприятные условия для метода поляризационного анализа обеспечиваются при регистрации сейсмоакустического поля в штольнях или камерах в однородных коренных породах, где магнитоупругие датчики жестко крепятся к стенкам, полу или специальным выемкам с помощью цемента. Хороших результатов можно ожидать при наблюдениях на достаточно крупных массивах коренных пород при их выходе на дневную поверхность. Условия регистрации в пределах осадочной толщи (например, в шурфах) крайне неблагоприятны, так как при различных положениях источника подход прямых продольных волн к приемникам будет близок к вертикальному, в связи с чем эффективность метода поляризационного анализа существенно снизится.

Вертикальное сейсмоакустическое профилирование глубоких скважин с позиций поляризационного анализа имеет ограничение по частотному диапазону. Согласно результатам исследований, описанных в [Кузнецов и др., 1993], ни одно из существующих прижимных устройств не может избавить от поляризационных искажений на частотах выше 80–100 Гц.

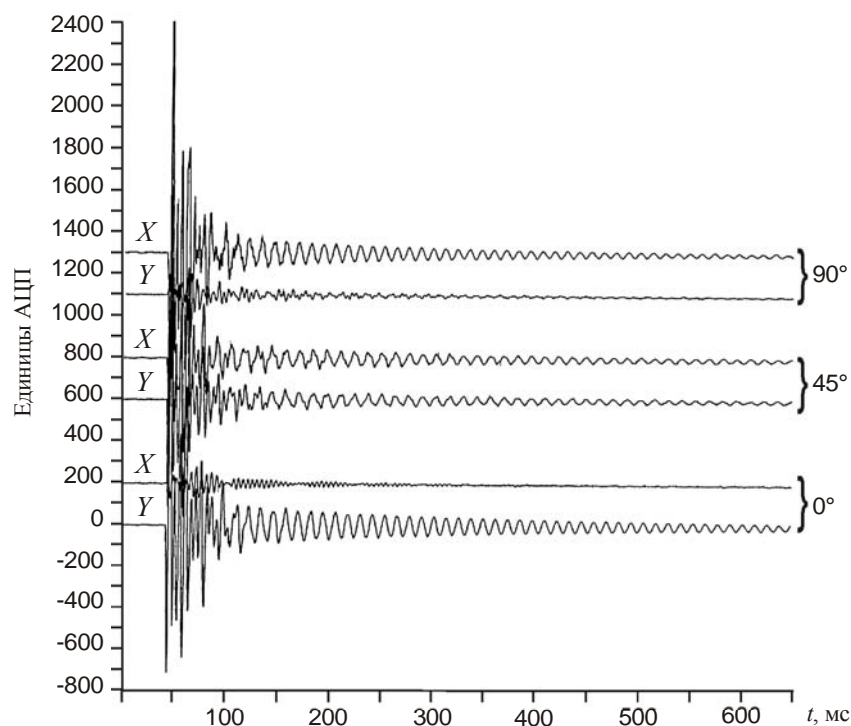


Рис. 5. Записи переходных характеристик горизонтальных X - и Y -компонент зонда ПСАК на временном интервале 0–600 мс. Условия возбуждения те же, что и на рис. 4

Однако высокочастотный поляризационный сейсмоакустический мониторинг на фиксированной глубине (а также в неглубоких специально пробуренных скважинах), по-видимому, проводить можно, если полость вокруг зонда залита цементом. До 80–100 Гц поляризационный анализ при наблюдениях в скважинах можно проводить и с обычными прижимными устройствами.

Однозначность результатов поляризационного анализа снижается в зоне интерференции волн, которая обычно имеет место в квазистационарном сейсмическом поле. Для повышения результативности можно применять регулируемый направленный прием, используя линейные или площадные расстановки приборов. Практически такие исследования можно проводить только с относительно дешевыми электродинамическими разведочными приемниками, выпускаемыми крупными партиями. В то же время, магнитоупругих датчиков к настоящему времени изготовлено ограниченное количество, а их стоимость достаточно высока.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-05-00141).

Автор выражает искреннюю признательность Н.И. Тимофеевой за помощь при доработке рукописи в научно-техническом и литературном планах.

Литература

- Беляков А.С. Аппаратура для сейсмоакустических исследований при вибрационном просвечивании // Сейсмическое вибровоздействие на нефтяную залежь. М.: ИФЗ РАН, 1993. С.100–113.
- Беляков А.С. Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований и прогноза землетрясений // Сейсм. приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2000. Вып. 33. С.27–45.
- Беляков А.С. Конструкции магнитоупругих геофонов // Сейсм. приборы. М.: ИФЗ РАН, 2004. Вып. 40. С.28–35.

- Беляков А.С. Феномен подземного звука // Земля и вселенная. 2009. № 2. С.36–45.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный фоновый звук и его связь с приливными деформациями // Изв. РАН. Физика Земли. 1999. № 12. С.39–46.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный фоновый звук и его энергетическая модель как компоненты прогноза землетрясений // Физика Земли. 2002. № 8. С.57–64.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Характеристики аппаратурно-программного комплекса для геоакустического мониторинга // Сейсм. приборы. 2007. Вып. 43. С.31–37.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. Сейсмоакустическая эмиссия, землетрясения и лунно-солнечные приливы // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 3. С.388–389.
- Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977. 279 с.
- Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. М.: Гостоптехиздат, 1960. 504 с.
- Кузнецов В.В., Лавров В.С., Севальнев А.В., Худзинский Л.Л. Результаты исследований искажений, вносимых зондами ВСП с различными прижимными устройствами // Сейсмическое вибровоздействие на нефтяную залежь. М.: ИФЗ РАН, 1993. С.113–126.
- Мирзоян Ю.Д., Ойфа В.Я. Поляризационный метод микросейсмического каротажа ПМ МСК // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. М.: ВИЭМС, 1979. № 11. С.35–41.
- Рудницкий В.П. Трехкомпонентные измерения амплитуд и сейсмических скоростей в скважинах // Геофизическая и астрономическая информация. Киев: Наук. думка, 1966. № 9. С.18–23.
- Справочник геофизика. Т. IV. Сейсморазведка. М.: Недра, 1966. 749 с.
- Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: ГИТТЛ, 1957. 192 с.
- Худзинский Л.Л. Техника и технология поляризационного метода ВСП при решении структурных задач: Дис. ... д-ра техн. наук. 1990. 262 с.
- Шехтман Г.А., Макаров Г.Ф. Способ прослеживания горизонтально поляризованных волн при ВСП неориентированным прибором // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. 1973. № 16. С.1–8.

Сведения об авторе

ХУДЗИНСКИЙ Лев Львович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-62-76. E-mail: leh@ifz.ru

ON EFFICIENCY OF THE DIFFERENT SENSORS FOR SEISMOACUSTIC MONITORING AND WAVE POLARIZATION ANALYSIS

L.L. Khudzinsky

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Some results obtained under study of the peculiarities and nature of the underground background sound (UBS) using the magnetoelastic geophones are presented. As a rule the registration was carried using the instrument-software averaging the signals at one minute interval, followed by smoothing on a more extended time intervals. Analysis of the amplitudes of the UDS variations and the discrete-frequency analysis of data collected at the outputs of the four analog bandpass filters are performed. The comparison of the frequency characteristics and transient features, obtained by magnetoelastic geophones and electrodynamic seismometers, allows the concluding on the preference of the latter for the purposes of wave polarization analysis. Some restrictions on the use of magnetoelastic geophones are considered as well as the possible ways for their modernization.

Keywords: magnetoelastic geophones, electrodynamic seismometers, frequency characteristics, transient features, wave polarization analysis.