

Геоакустические шумы в Кольской сверхглубокой скважине

Ю.Г. Астраханцев¹, Д.М. Губерман², Б.П. Дьяконов³, С.Л. Певзнер²,
А.К. Троянов¹, Ю.Н. Яковлев²

¹ Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

² НПЦ "Кольская сверхглубокая", Заполярный

³ ВНИИГЕОсистем, Москва

Аннотация. Рассмотрены результаты исследований распределения геоакустических шумов в диапазоне частот 100-5000 Гц по глубине Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Показано, что вскрытый скважиной геологический разрез в интервале 300-6840 м по параметрам трехкомпонентных измерений геоакустических шумов (ГАШ) является динамически активным. При сравнении данных, полученных через годовые интервалы времени, обнаружена вертикальная миграция зон напряженного состояния пород, фиксируемая появлением новых или исчезновением ранее выявленных локальных аномалий ГАШ. На основе анализа амплитудно-частотных спектров ГАШ отмечено газовыделение из массива пород, в частности, в зонах тектонической нарушенности геологической среды.

Abstract. The results for investigation of geoaoustic noises distribution in a range of 100-5000 Hz along the Kola Superdeep Borehole (SG-3) have been discussed. A geological section cut by the borehole in the interval of 300-6840 m is shown to be dynamically active by parameters of three-component measurements of geoaoustic noises (GAN). When comparing the data obtained at a year intervals, we found a vertical migration of zones of the stressed state of rocks that is fixed by appearance of new GAN local anomalies or disappearance of those found earlier. From the analysis of the GAN amplitude-frequency spectra, gas emission from the rock massif has been observed, in particular, at the zones of tectonic dislocation of the geological environment.

1. Введение

Земная кора является открытой термодинамической системой с иерархически блочным строением и находится в напряженном состоянии под воздействием внешних и внутренних сил. Распределение напряжений в массиве пород зависит не только от действующих нагрузок, но и от степени неоднородности, трещиноватости пород. Изменение напряженного состояния пород вызывает их деформацию на разных масштабных уровнях, приводит к перестройке системы трещин в контактных поверхностях и появлению новых дефектов, что сопровождается акустической эмиссией, обуславливающей возникновение аномалий ГАШ. Такова общая схема возбуждения в объеме геосреды аномалий ГАШ.

Интерес к изучению ГАШ в сверхглубоких скважинах обусловлен возможностью получения принципиально новой информации о современных динамических процессах, включая флюидогазодинамику, в объеме геосреды при высоких температурах и литостатических давлениях.

2. Методика

Разработанная в Институте геофизики УрО РАН цифровая аппаратура для измерения геоакустических шумов в скважинах (Астраханцев, Троянов, 1998) обладает чувствительностью, позволяющей регистрировать акустический отклик геосреды на деформации порядка 10^{-8} - 10^{-11} м. Регистрация ГАШ осуществляется тремя ортогонально расположенными датчиками-акселерометрами типа ДНЗ (преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный). В скважинном приборе устанавливаются датчики с коэффициентами преобразования по напряжению не менее 6-10 мкВ·с²/мм. Амплитудный уровень ГАШ в разных полосах частот выражается в единицах регистрируемого ускорения (мм/с²). Запись сигналов происходит с трех направлений благодаря слабой поперечной чувствительности датчиков (относительный коэффициент поперечного преобразования не более 4-10 %). Поперечная чувствительность датчика-акселерометра определяется его максимальной чувствительностью к колебаниям в направлении, перпендикулярном его главной оси, т.е. параллельном поверхности, на которой он установлен. Дополнительным благоприятным фактором для разделения сигнала с трех направлений является малая амплитуда микровибраций геосреды. Фиксирование в скважине на заданной глубине сигналов с трех направлений дает возможность сравнения их амплитуд в разных полосах частот.

Распределение амплитудного уровня ГАШ по глубине происходит по-разному и может испытывать локальные изменения во времени. Амплитудный уровень ГАШ зависит от геологических и тектонических особенностей исследуемой среды. Максимальные уровни геоакустических сигналов наблюдаются на участках современных активных микродвижений земной коры и пространственно

совпадают с зонами разломов, интервалами дробления и трещиноватости горных пород по разрезу скважины (Дьяконов и др., 1986).

Основной вклад в интегральный уровень ГАШ вносит, как правило, низкочастотная часть спектра (100-500 Гц), но возможно доминирование высокочастотной ветви спектра (500-5000 Гц). Факт увеличения интегрального уровня ГАШ на больших глубинах за счет более высоких частот свидетельствует о формировании шумового поля источниками эндогенного происхождения. Возникновение эндогенных ГАШ в скважинах на больших глубинах связано с проявлением геодинамических процессов, обуславливающих образование в объеме геосреды акустически активных зон.

3. Обсуждение и анализ результатов

В Кольской сверхглубокой скважине (СГ-3) с использованием описанной аппаратуры были проведены исследования геоакустических шумов в декабре 2000 г., мае 2001 г. и ноябре 2002 г. по методике дискретного каротажа при спуске скважинного прибора. Шаг измерений составлял 10 и 20 м. В декабре 2000 г. распределение ГАШ изучали в интервале глубин 500-6000 м. В данном интервале в полосе частот 0.1-0.5 кГц при шаге измерений 10 м обнаружен ряд аномалий амплитудного уровня ГАШ различной интенсивности (рис. 1а). При повторных измерениях (22-23.05.2001 г.) в интервале глубин 300-6790 м в той же полосе частот распределение аномалий ГАШ стало другим (рис. 1б). Минимальный амплитудный уровень ГАШ при первом и повторном измерениях изменился незначительно и составил 0.22-0.25 мм/с².

Исчезнувшая при повторных измерениях ранее выявленная аномальная зона ГАШ в интервале глубин 5000-6000 м (рис. 1а), и проявившиеся две аномальные зоны на глубинах 3020-3550 м и 2100-2500 м (рис. 1б) указывают, в первую очередь, на наличие вертикальной миграции зон напряженного состояния массива пород.

Подобные процессы, связанные с появлением или исчезновением аномалий ГАШ в течение разных отрезков времени, были замечены при исследовании ГАШ в Уральской сверхглубокой скважине (Дьяконов, Троянов, 1999).

Обнаруженная геоакустическая активность горных пород на больших глубинах в скважине СГ-3 является принципиальным результатом, свидетельствующим о динамике геологической среды в условиях высоких литостатических давлений, а также о протекании процессов, противостоящих консолидации верхней части земной коры. Объяснить образование акустически активных зон на больших глубинах можно следующим образом.

Из экспериментальных работ известно, что с возрастанием всестороннего давления на образцы горных пород число трещин в них уменьшается и повышается прочность пород. В реальных условиях верхней части земной коры наблюдаются существенные отклонения от этих закономерностей, что обусловлено рядом причин, в том числе непрерывными физико-химическими процессами в проницаемых, заполненных флюидами и газами горных массивах. Прочность хрупких пород хорошо аппроксимируется модифицированным условием Кулона-Мора (Борисов, 1980):

$$\sigma_p = \tau_c + f(\sigma_n - P),$$

где τ_c – сила сцепления пород; f – коэффициент трения при сдвиге; σ_n и P – нормальное напряжение в породе и давление в жидкости, заполняющей трещину, соответственно.

Когда величина f мала, а значения σ_n и P близки, что характерно для замкнутых объемов, то на больших глубинах прочность на сдвиг пород будет в основном определяться силой их сцепления. Как показывают лабораторные эксперименты, она растёт с повышением давления, так как уменьшаются размеры дефектов и возрастает величина модуля упругости пород. Но при этом следует иметь в виду, что прочность на разрыв пород будет увеличиваться только в том случае, если поверхностная энергия трещин не будет эквивалентно уменьшаться. Фактически же с глубиной флюиды снижают свободную поверхностную энергию трещин. Кроме того, прочность связи пород может уменьшаться за счёт эффекта Ребиндера, что учитывается, например, в модифицированной формуле Гриффитса (Бартнев, Карташов, 1987):

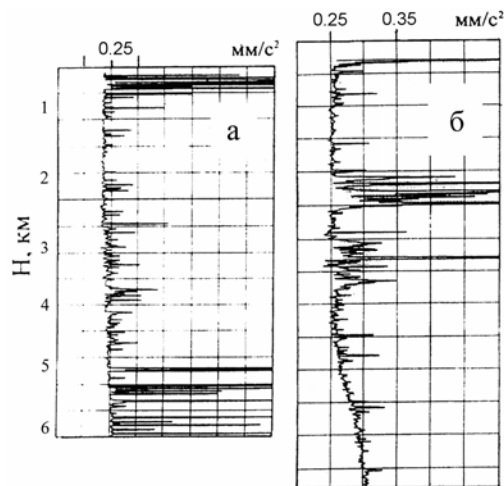


Рис. 1. Диаграммы распределения интегрального уровня ГАШ по глубине СГ-3 в полосе частот 0.1-0.5 кГц (горизонтальная компонента) при измерениях в декабре 2000 г. (а) и в мае 2001 г. (б)

$$\sigma = \{2Gw / [(1 - \mu^2) \pi l] - \sigma_{pl}/2\}^{0.5},$$

где G – модуль сдвига; w – плотность поверхностной энергии трещин; l – критическая длина трещины; μ – коэффициент Пуассона; σ_{pl} – прочность при растяжении пород в вершине трещины с учетом эффекта Ребиндера.

В понижение прочности пород вносят также свой вклад коррозия под напряжением, электрохимические процессы и, наконец, рост температуры с глубиной.

Энергия активации на разрыв горных пород возрастает с повышением давления и уменьшается с увеличением температуры. В результате действия этих двух основных конкурирующих факторов энергия активации на разрыв пород может достигать минимума, и за счёт термофлуктуационного механизма, сдвиговых квазистационарных напряжений и сравнительно незначительных факторов может увеличиваться вероятность возникновения разрывных дефектов. Тем самым могут создаваться условия для сохранения проницаемости разломов и образования трещиноватых горизонтов пород с аномально высоким амплитудным уровнем ГАШ (Дьяконов, Троянов, 1989).

Из сопоставления диаграмм высокочастотных ГАШ, полученных в скважине СГ-3 22-23.05.2001г. (рис. 2а) и 25-26.05.2001 г. (рис. 2б), видно, что они отличаются как по форме, так и по величине регистрируемых амплитуд сигналов. Это указывает на интенсивную изменчивость во времени динамических процессов в приствольной части скважины. Минимальный уровень ГАШ в диапазоне частот 0.5-2.5 кГц изменился от 0.13 мм/с² (рис. 2а) до 0.4 мм/с² (рис. 2б), т.е. повысился в 3 раза через трое суток. Возрастание амплитуд сигналов с появлением локальных аномалий высокочастотных ГАШ на фоне незначительного увеличения низкочастотных сигналов (рис. 2б) может быть связано с повышением интенсивности процессов газовыделения из массива пород.

Применение информативных параметров $M1$ и $M2$, характеризующих соотношение сигналов с горизонтальных датчиков одинаковой чувствительности в полосах частот 0.1-0.5 кГц и 0.5-2.5 кГц, соответственно, позволяет обнаружить участки анизотропного распределения источников ГАШ. В однородной изотропной среде величина соотношения сигналов горизонтальных компонент близка к единице. Экспериментально установлено, что при контакте пород, различающихся по коэффициенту Пуассона, а также на участках со скачками пластовых скоростей по данным ВСП, в зонах с максимальными значениями интервального времени t по акустическому каротажу и в пластах, где поперечное сечение ствола скважины принимает форму эллипса, величина соотношения сигналов с горизонтальных датчиков ($M = X / Y$) не равна единице.

В интервале исследуемого разреза СГ-3 выделяется несколько участков аномальных отклонений параметра M от единицы (рис. 3). Несомненный интерес представляет изменение значений параметров $M1$ и $M2$ в интервале глубин 300-2000 м. Как видно, на этих глубинах $M1 < 1$, а $M2 > 1$, т.е. при неизменном положении датчиков в точке измерения низкочастотный сигнал с горизонтального датчика X более слабый, чем высокочастотный. Другими словами, здесь наблюдается разделение направлений микровибраций геосреды в разных частотных областях, обусловленное двумя независимыми источниками. Такое соотношение параметров возможно в том случае, когда

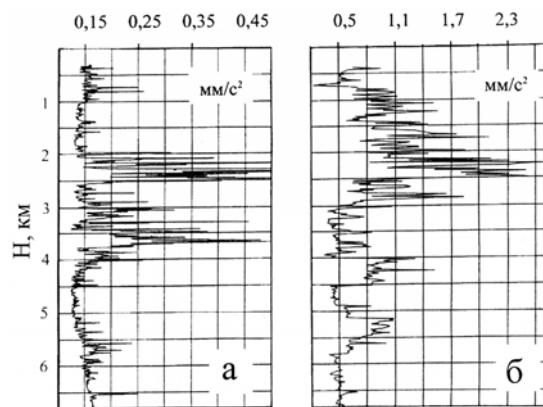


Рис. 2. Диаграммы высокочастотных ГАШ по глубине СГ-3, полученные 22-23.05.2001 г. (а) и 25-26.05.2001 г. (б).

Результирующая сигналов с горизонтальных датчиков X и Y

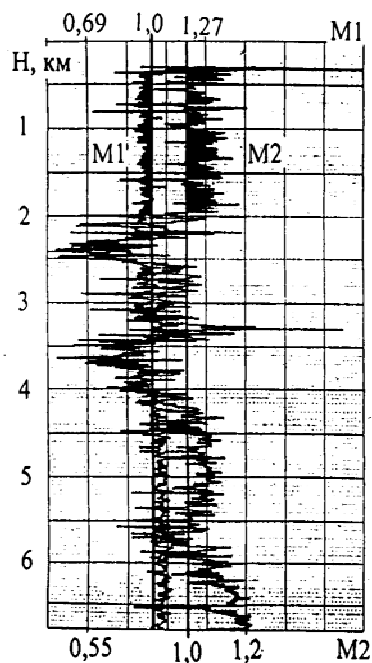


Рис. 3. Изменение значений параметров $M1$ и $M2$ ГАШ по глубине СГ-3

доминирующее направление микровибраций массива пород перпендикулярно длинной оси эллипсоидного сечения ствола скважины. Ниже глубины 2000 м отмечаются согласованные изменения параметров M1 и M2. Следует заметить, что разброс значений параметра M2 (от 0.45 до 1.25) значительно больше, чем M1. Из этого можно сделать вывод об относительной геомеханической устойчивости стенок скважины: они находятся в микроколебательном режиме с изменяющейся интенсивностью процессов во времени.

При разработке методики трехкомпонентного геоакустического каротажа экспериментально было установлено, что амплитудный уровень сигналов с вертикального датчика составляет 60-70 % от сигналов с горизонтальных датчиков. Увеличение уровня сигналов с вертикального датчика, например, при измерениях вблизи активного субвертикального разлома, свидетельствует о преобладании вертикальной направленности современных микроколебаний массива пород. При полученном соотношении сигналов $Z1/H1 = 0.13/0.2$ уровень ГАШ с вертикального датчика составляет 65 % от уровня сигнала с горизонтальных датчиков. В нижней части исследованного интервала $Z1/H1 = 0.19/0.24$, т.е. уровень сигналов Z1 составляет около 80 % от уровня сигналов H1. Такое увеличение амплитуды сигналов Z1 указывает на наличие ниже отметки 6800 м источника субвертикальных микроколебаний геосреды.

В нижней части исследованного интервала амплитуды сигналов Z2 не превышают 70 % от уровня сигналов H2. Учитывая ограниченную глубинность распространения высокочастотных сигналов (0.5-5.0 кГц) по сравнению с низкочастотными (0.1-0.5 кГц), можно утверждать, что источник субвертикальных микроколебаний находится значительно ниже отметки 6800 м.

По данным исследований, геодинамическая активность массива пород оценивается пределами изменения значений компонент ГАШ во времени. В связи с этим было проведено сравнение результатов измерения параметров H1, Z1 и H2 ГАШ по глубине СГ-3 в ноябре 2002 г. и в мае 2001 г.

Шаг измерения ГАШ в 2001 г. составлял 10 м, в 2002 г. – 20 м, поэтому кривая изменения параметра H1 по глубине СГ-3 (рис. 4а) в первом случае более изрезана, чем во втором (рис. 4б). Как видно, минимальный уровень значений H1 снизился с 0.25 мм/с² (2001 г.) до 0.2 мм/с² (2002 г.), т.е. уменьшился на 20 %. Обнаруженные в 2001 г. интенсивные аномалии параметра H1 в интервалах глубин 2-2.5 и 3-3.7 км (рис. 4а) частично проявились небольшим увеличением уровня H1 в 2002 г. На записях с шагом измерений 20 м появилось несколько новых узких аномалий ГАШ (рис. 4б). В плане временной устойчивости пространственного положения аномальной зоны ГАШ можно выделить участок повышения минимального уровня параметра H1 в интервале глубин 5-6.8 км.

Сравнение диаграмм параметра Z1 (рис. 5) показало, что в 2002 г. его минимальный уровень уменьшился на 30 %, исчезли ранее обнаруженные и появились новые аномалии. Некоторые аномалии ГАШ, включая повышение их уровня к отметке 6800 м, сохранили свое пространственное положение.

Уменьшение амплитуд микроколебаний пород при измерениях в 2002 г. отразилось и в высокочастотной области ГАШ (рис. 6). Амплитуда минимального уровня H2 уменьшилась по сравнению с 2001 г. на 15 %, выделилось три аномалии, сохранившие свое пространственное положение.

Полученные данные свидетельствуют об активности современных геодинамических процессов в исследованном интервале разреза скважины СГ-3. В зонах аномальных значений ГАШ, свидетельствующих об активности динамических процессов, отмечается пониженный выход керна и увеличение диаметра ствола скважины, т.е. наблюдается снижение геомеханической устойчивости массива пород.

4. Выводы

1) Геологический разрез, вскрытый скважиной СГ-3 в интервале глубин 300-6790 м, является динамически активным. Обнаружена вертикальная миграция зон напряженного состояния массива пород.

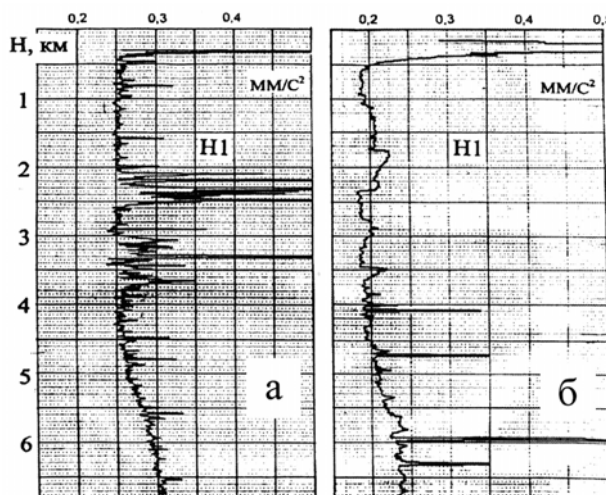


Рис. 4. Сравнение результатов измерения горизонтальной компоненты H1 ГАШ в полосе частот 0.1-0.5 кГц в мае 2001 г. (а) и ноябре 2002 г. (б)

2) По обнаруженным высокочастотным аномалиям ГАШ можно судить как о кинетике трещинообразования в массиве пород, так и о процессах газовыделения.

3) Высказано предположение о наличии источника субвертикальных микроколебаний геологической среды, расположенного ниже отметки 6800 м.

4) В зонах аномальных значений ГАШ, свидетельствующих об активности динамических процессов, отмечается пониженный выход керна и увеличение диаметра ствола скважины, т.е. наблюдается снижение геомеханической устойчивости массива пород.

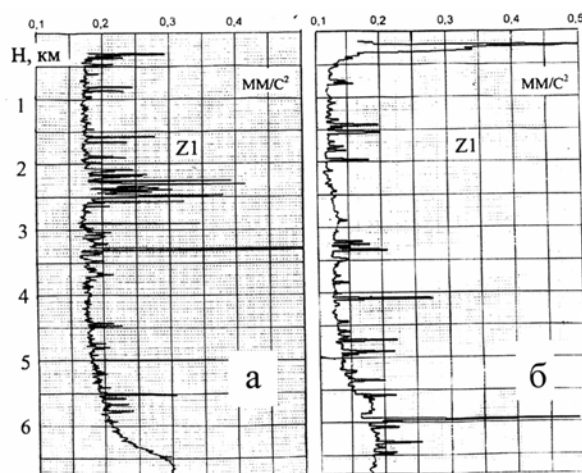


Рис. 5. Сравнение результатов измерения вертикальной компоненты Z1 ГАШ в полосе частот 0.1-0.5 кГц в мае 2001 г. (а) и ноябре 2002 г. (б)

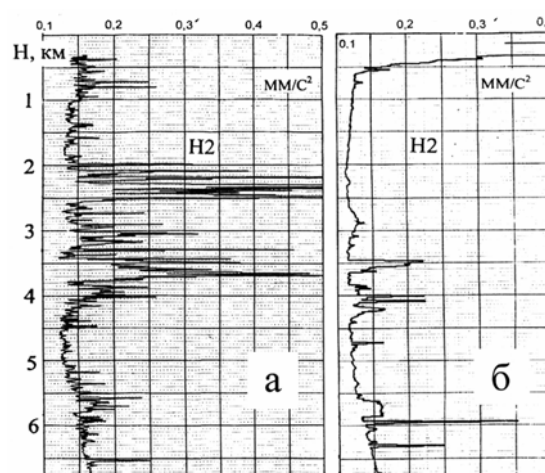


Рис. 6. Сопоставление амплитудных уровней параметра H2 ГАШ в полосе частот 0.5-5.0 кГц по данным 2001 г. (а) и 2002 г. (б)

Работа выполнена по Проекту МПГК № 408 ЮНЕСКО и по гранту ИНТАС № 01-0314.

Литература

- Астраханцев Ю.Г., Троянов А.К.** Патент 2123711 РФ, МКИ; G01V1/40. Устройство для измерения геоакустических шумов в скважине. Бюлл. № 35, 1998.
- Бартенев Г.М., Карташов Э.М.** Влияние поверхностно-активных сред на пороговое неразрушающее напряжение полимеров в хрупком состоянии. *Докл. АН СССР*, т.296, № 4, 1987.
- Борисов А.А.** Механика горных пород и массивов. М., Недра, 1980.
- Дьяконов Б.П., Троянов А.К.** Проблемы геодинамики и мониторинг геоакустических шумов в Уральской сверхглубокой скважине. *Сб. научных трудов ФГУП НПО "Недра"*. Ярославль, вып. 5, с.58-66, 1999.
- Дьяконов Б.П., Троянов А.К.** О возбуждении естественных сейсмоакустических шумов в земной коре. *Деп. ВИНТИ*, 15.11.89. № 6674-В89, 1989.
- Дьяконов Б.П., Улитин Р.В., Троянов А.К., Фадеев В.А.** Способ скважинной сейсмической разведки. Авт. свид. 1236394. Бюлл. № 21, 1986.