

СКВАЖИННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ АППАРАТУРЫ

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Троянов А.К., Глухих И.И., Вдовин А.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Исследование геоакустических сигналов, электромагнитных полей, их взаимосвязь, влияние на них вариаций геомагнитного поля в скважинах представляет большой научный и практический интерес. В данной статье описана аппаратура, позволяющая одновременно и непрерывно производить измерения геоакустических сигналов в трех диапазонах частот 100–500, 500–5000, 2500–5000 Гц, электромагнитных полей на трех частотах 40, 80, 120 кГц и вариаций геомагнитного поля в скважинах с чувствительностью $\pm 2,5$ нТл. Приведены примеры использования данной аппаратуры в различных скважинах. Показано наличие или отсутствие взаимосвязи различных сигналов в зависимости от динамики среды.

Электромагнитная эмиссия, геоакустические сигналы, геодинамическое состояние среды, вариации геомагнитного поля, скважинные измерения.

ROCKS DYNAMIC STATE BOREHOLE INVESTIGATION USING THE NEW EQUIPMENT

Astrakhantsev Yu.G., Beloglazova N.A., Troyanov A.K., Gluchich I.I., Vdovin A.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. An investigation of geoacoustic signals, electromagnetic fields, their relationship, geomagnetic field variations' influence on them in boreholes is of great scientific and practical interest. The equipment allowing simultaneous and uninterrupted measurement of geoacoustic signals in three frequency ranges of 100–500, 500–5000, 2500–5000 Hz, measurement of electromagnetic fields at three frequencies of 40, 80, 120 kHz and geomagnetic field variations in boreholes with sensitivity of ± 2.5 nT is described in the paper. The examples of the equipment application in different boreholes are adduced. There is shown the presence or absence of the relationship between signals of different physical nature depending on physical-mechanical properties and environment dynamics.

Electromagnetic emissions, geoacoustic signals, geodynamic state of the environment, variations in the geomagnetic field, well measurements.

Введение

В районах разработки и добычи полезных ископаемых нередко случаи проявления горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений. Поэтому проблема оценки изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, прогноз и предупреждение удароопасности приобретает особую остроту. Различия в механизмах геодинамических явлений, энергии и степени воздействия на окружающую среду определили различные подходы к оценке напряженно-деформированного состояния таких массивов и прогнозу динамических явлений в них.

Проблема исследования современного динамического состояния массивов горных пород в их естественном залегании путем

скважинных измерений породила необходимость создания соответствующей аппаратуры. Так как скважина является чувствительным объемным деформометром и прямо отражает изменения напряженно-деформированного состояния в земле, то скважинные измерения дают значительно больше информации по сравнению с поверхностными исследованиями. Установлено, что процесс формирования электромагнитного излучения (ЭМИ) отражает динамику зарождения и развития структурного разрушения пород. При этом процесс излучения носит импульсный характер – по мере перехода процесса разрушения с низшего энергетического уровня на более высокий, возрастают параметры ЭМИ (число импульсов, напряженность). В то же время способность горных пород

излучать акустические импульсы используется для получения информации о неоднородности, нарушенности, напряженном состоянии горных пород, а так же развивающихся в земной коре динамических процессах. В горных породах при хрупком разрушении геоакустическая эмиссия (ГАЭ) обусловлена развитием микро- и макротрещин. По ГАЭ оценивают ударопрочность горных пород, контролируют состояние массива пород и процессы разрушения. Геомагнитным предвестникам землетрясений издавна уделялось большое внимание, так как вследствие существования пьезомагнитного эффекта и наличия в горных породах магнитных минералов изменения напряженного состояния должны отражаться в вариациях геомагнитного поля. Изучение связи между ЭМИ, ГАЭ и напряженностью геомагнитного поля в скважинах позволяет не только понять механизм процесса, но и охарактеризовать динамические свойства трещиноватой среды, определить какой из ее параметров, проявляющихся в полях различной физической природы, является доминирующим и ответственным за наблюдаемый процесс.

Для решения вышеизложенных задач в лаборатории скважинной геофизики УрО РАН создан комплексный прибор МЭШ-42, прототипом которого послужила разработанная ранее аппаратура, позволяющая проводить измерение ГАЭ в нескольких частотных диапазонах (Патенты 2123711; 2173778; 2445653), широко применяемая на нефтегазовых месторождениях для определения характера насыщенности коллекторов на стадии эксплуатации скважин и при контроле за разработкой нефтяных и газовых месторождений. Создание комплексной аппаратуры, позволяющей одновременно измерять несколько геофизических полей (напряженность геомагнитного поля, ГАЭ и ЭМИ), значительно расширило диапазон решаемых задач. Прибор можно использовать как для проведения каротажа, так и для долговременных режимных наблюдений в скважине.

Устройство и принцип работы прибора

Функциональная схема прибора представлена на рис. 1.

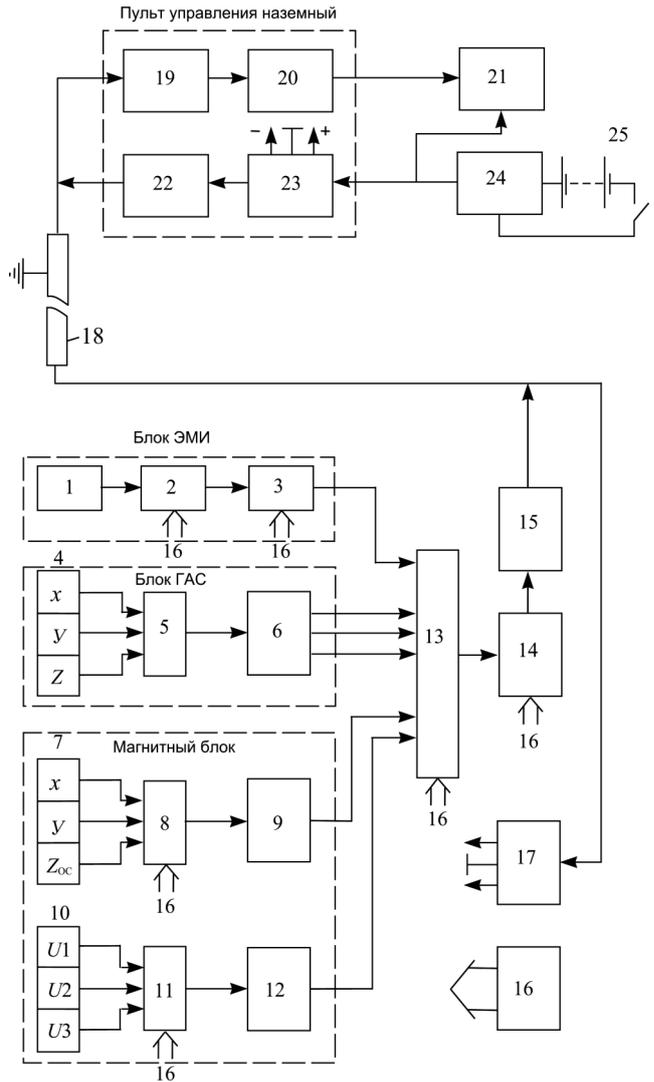


Рис. 1. Функциональная схема МЭШ-42:

1 – ферритовая антенна ЭМИ; 2 – коммутируемый блок конденсаторов; 3 – измерительная схема ЭМИ с выходом на постоянном токе; 4 – блок из трех датчиков геоакустических сигналов; 5 – коммутатор; 6 – усилитель, блок фильтров и выпрямители; 7 – блок из трех ортогонально расположенных феррозондов; 8 – коммутатор сигналов феррозондов; 9 – измерительная схема магнитометра; 10 – блок акселерометров; 11 – коммутатор сигналов акселерометров; 12 – повторитель напряжения; 13 – общий коммутатор сигналов; 14 – аналого-цифровой преобразователь; 15 – блок передачи цифровой информации; 16 – блок управления скважинного прибора; 17 – блок питания; 18 – одножильный каротажный кабель; 19 – входной усилитель; 20 – блок связи с персональным компьютером; 21 – персональный компьютер (Note Book); 22 – блок питания скважинного прибора; 23 – блок питания наземного пульта; 24 – преобразователь напряжения 25 – аккумулятор

Аппаратура содержит три измерительных блока, позволяющих преобразовывать измеряемые параметры в сигналы постоянного тока. Эти сигналы через коммутатор (13) поочередно поступают на вход аналого-цифрового преобразователя и далее – на блок передачи цифровой информации. Схема содержит блок управления (16), осуществляющий своевременное включение соответствующих измерительных блоков, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и блока передачи цифровой информации, который преобразует цифровую информацию с выхода АЦП в последовательные коды (RS-232), позволяющие передавать их по каротажному кабелю. По каротажному кабелю передается также и напряжение питания скважинного прибора, которое стабилизируется и преобразуется в разнополярное блоком питания. На поверхности сигналы с каротажного кабеля усиливаются, преобразуются и подаются через специальный переходной узел на USB-порт персонального компьютера. При каротажных работах используется датчик глубин. Синхронизация сигналов осуществляется по паузе в передаче сигналов.

Как видно из функциональной схемы (см. рис. 1), технические характеристики аппаратуры в основном зависят от технических характеристик измерительных блоков при условии достаточно высокого качества АЦП.

Рассмотрим функциональные схемы измерительных блоков.

Блок измерения электромагнитного излучения (Блок ЭМИ) выполнен по схеме супергетеродинного приемника. Входной контур образуется из ферритовой антенны (1) и блока конденсаторов (2), поочередно подключаемых коммутатором к антенне. Принятые сигналы после усилителя поступают на преобразователь частоты, на второй вход которого подается напряжение с управляемого генератора. Частота генератора равна частоте настройки контура: 40, 80 и 120 кГц. Полоса пропускания усилителя промежуточной частоты f_n равна 100–2000 Гц.

Полосы частот принимаемых сигналов (f_{Cn}):

$$f_{C1} = f_r + f_n;$$

$$f_{C2} = f_r - f_n,$$

где f_r – частота управляемого генератора.

Добротность входного контура выбирается такой, чтобы полоса пропускания была более 4 кГц. При этом регистрируются обе полосы частот f_{C1} , f_{C2} , что позволяет увеличить вероятность попадания сигналов в принимаемый диапазон. Выходное напряжение усилителя промежуточной частоты выпрямляется амплитудным выпрямителем и подается далее на АЦП (14). Аналогичный принцип приема сигналов ЭМИ был применен ранее в аппаратуре МЧЗ-8 (Байдиков, Человечков, 2011).

Блок измерения геоакустических сигналов (Блок ГАС) использует в качестве приемников три взаимоортогональных, жесткозакрепленных пьезокерамических преобразователя Z , X , Y (4) марок ДН-3-М1, Д13 или АР57, имеющих поперечную чувствительность менее 10% от осевой. Через коммутатор (5) выходные сигналы преобразователей подаются на вход малошумящего, с большим входным сопротивлением усилителя и, далее, на блок фильтров (6), который выделяет три полосы частот (100–500; 500–5000; 2500–5000 Гц). Сигналы, выделяемые блоком фильтров, выпрямляются, поступают на коммутатор сигналов (13) и далее – на АЦП (14). Так как пьезокерамические датчики поочередно подключаются к одному и тому же блоку фильтров, мы можем судить о характере, полосе частот и амплитуде сигналов в скважине по каждой из осей измерения. В измерительном блоке предусмотрена проверка параметров усилителя, фильтров и АЦП путем подачи калибровочного сигнала от высокостабильного генератора, входящего в блок управления.

Магнитный измерительный блок содержит три взаимоортогональных жесткозакрепленных феррозонда Z_{oc} , X , Y (7), которые через коммутатор (8) поочередно подключаются к входу измерительной схемы магнитометра (9), работающей на второй гармонике. Соосно с феррозондами укреплены акселерометры $U1$, $U2$ и $U3$ (10), которые через коммутатор (11) пооче-

редно подключаются к повторителю напряжения (12). Из шести параметров Z_{oc} , X , Y , U_1 , U_2 , U_3 в точке измерения вычисляются значения составляющих вектора геомагнитного поля Z , H_x , H_y в вертикальной системе координат, привязанной к плоскости наклона скважины, угол наклона скважины φ и угол поворота прибора вокруг своей оси α (Астраханцев, Белоглазова, 2012).

Основные технические характеристики МЭШ-42

Магнитный канал:

диапазон измерений составляющих поля $\pm 70 \cdot 10^3$ нТл;

разрешающая способность $\pm 2,5$ нТл.

Геоакустический канал:

диапазон измерений $1-10$ мм/с²;

разрешающая способность $0,5$ мм/с².

Электромагнитный канал:

диапазон измерений (на частотах 40; 80; 120 кГц) $1-50$ пТл;

разрешающая способность $0,5$ пТл.

Период измерения всех параметров $1,6$ с.

Методика измерений

Применение специальной конструкции из трех датчиков-акселерометров позволяет проводить измерения ГАЭ как в открытом, так и в обсаженном стволе скважины, измерения ЭМИ и напряженности геомагнитного поля возможны только в открытом стволе. Использование трехкомпонентной системы измерений позволяет регистрировать одновременно сигналы в горизонтальном и вертикальном направлениях, соотношения которых дают дополнительную геологическую информацию.

Измерения с комплексным прибором могут проводиться в двух режимах:

1. Измерения по стволу скважины по точкам. Шаг измерений зависит от решаемых геологических задач. Цикл опроса всех датчиков составляет 2 с. В процессе измерений на каждой точке проводится 10

циклов измерений 20 параметров, которые автоматически записываются в текстовый файл. После окончания каротажа разработанными программными методами производится расчет полученных данных. Усредняются 10 циклов измерений на каждой точке. Из полученных значений рассчитываются выходные параметры и формируются три las-файла, характеризующие геомагнитные, акустические и электромагнитные измерения.

2. Режимные наблюдения на заданных глубинах в разных масштабах времени (первые минуты, часы, сутки). Производится запись в текстовый файл всех параметров функции времени в формате Windows с дискретностью 2 с. После записи файла – поминутное усреднение первичных данных и расчет выходных параметров. Построение диаграмм первичных и рассчитанных данных в функции времени проводится с помощью разработанного программного модуля.

Наибольший объем информации о геодинамическом состоянии района, взаимосвязи временных изменений сигналов ГАЭ, ЭМИ и напряженности геомагнитного поля можно получить на основе долговременных режимных наблюдений. Для выбора глубины установки прибора проводятся исследования по стволу скважины. На основе полученных каротажных диаграмм и имеющейся геологической информации выбираются зоны, наиболее интересные для режимных наблюдений. К таким зонам можно отнести интервалы, где проявляются деформационные процессы, отмечаемые аномальными значениями одного или нескольких измеряемых геофизических полей.

Примеры исследований с аппаратурой МЭШ-42

На рис. 2 приведен пример исследования опорно-параметрической скважины «Онежская» (г. Кондопога), где на глубине 2940 м наблюдается контакт отложений каменной соли и гранитоидов, которые выделяются на диаграмме вертикальной составляющей геомагнитного поля (Z) повышением фоновых значений.

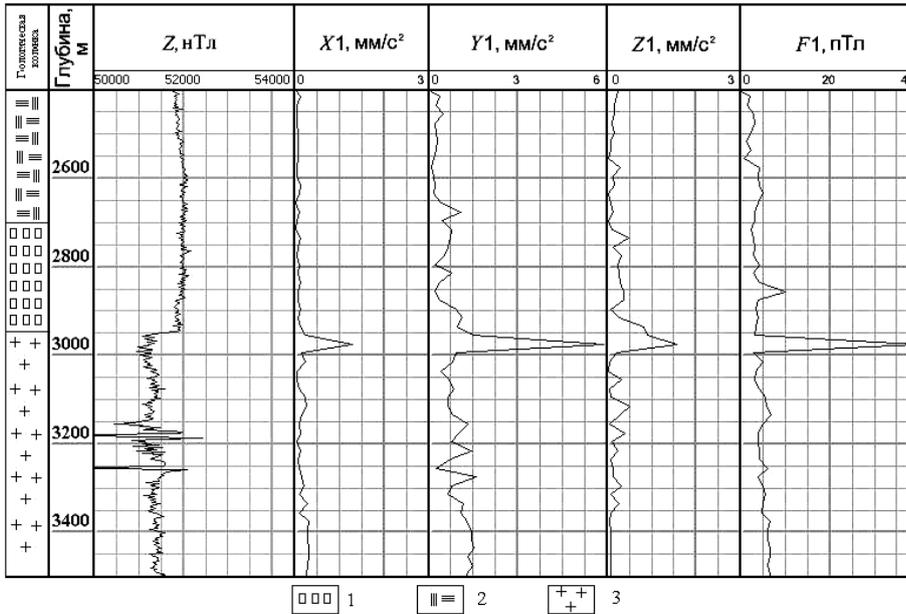


Рис. 2. Онежская скважина (по материалам ФГУП «Недра»):
1 – каменная соль; 2 – ангидриты; 3 – гранитоиды

Данный контакт представляет собой интервал нарушенных (трещиноватых) пород, различающихся прочностными свойствами и отмечается узкими интенсивными аномалиями составляющих ГАЭ (X_1 , Y_1 , Z_1) и ЭМИ (F_1) первого частотного диапазона. Расположенный выше контакт ангидритов и каменной соли не сопровождается нарушением пород и поэтому не выделяется аномалиями ГАЭ и ЭМИ.

На рис. 3 приведены изменения сигналов ГАЭ и ЭМИ за цикл измерений (20 с) на глубинах 2860 м (каменная соль), 2940 м (контакт пород) и 3020 м (гранитоиды). Резкие скачки амплитуд ГАЭ и ЭМИ за цикл наблюдений (почти на

порядок) в течение 20 с на глубине 2940 м указывает на то, что источники эмиссии локализованы именно на контакте пород. Если бы интервал приема сигналов был существенно большим, то временные измерения были бы более плавными (Троянов и др., 2011).

В сентябре 2009 г. были выполнены измерения в экспериментальной скважине «Родыгино» на Камчатском геодинамическом полигоне. При проведении измерений по стволу скважины на глубине 790 м была зарегистрирована динамически активная зона, сопровождаемая аномалиями ГАЭ и ЭМИ. Такой же по величине уровень ЭМИ (до 35 пТл) был зафиксирован на контакте пород в скв. Онежская (см. рис. 3). На этой глубине и был установлен прибор для режимных наблюдений.

Измерялись следующие параметры: вертикальная (Z) и горизонтальная (H) составляющие напряженности геомагнитного поля, азимут горизонтальной составляющей (A), угол поворота корпуса скважинного прибора, электромагнитное излучение на частотах 45 (F_1), 80 (F_2) и 120 (F_3) кГц, вертикальная (Z_1 , Z_2 , Z_4) и горизонтальная (H_1 , H_2 , H_4) составляющие геоакустической эмиссии в диапазонах 100–500, 500–5000 и 2500–5000 Гц, соответственно. Установившийся режим (по углу поворота корпуса скважинного прибора) с 13⁰⁰ ч (GMT) 10 сентября – 304°40'. Местное время на момент

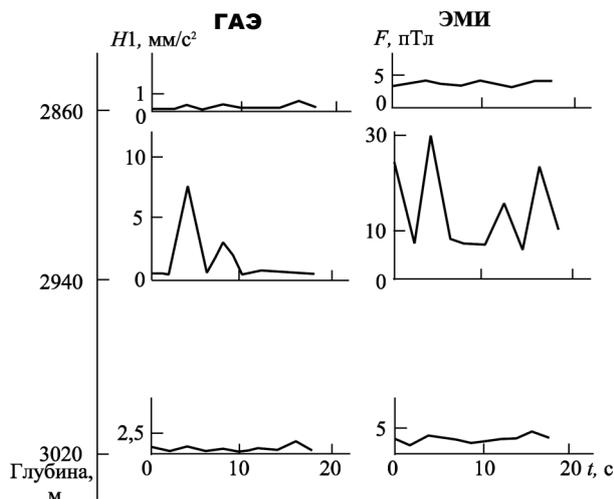


Рис. 3. Временная развертка сигналов ГАЭ и ЭМИ (скв. Онежская) за один цикл измерений в трех точках (2860, 2940, 3020 м)

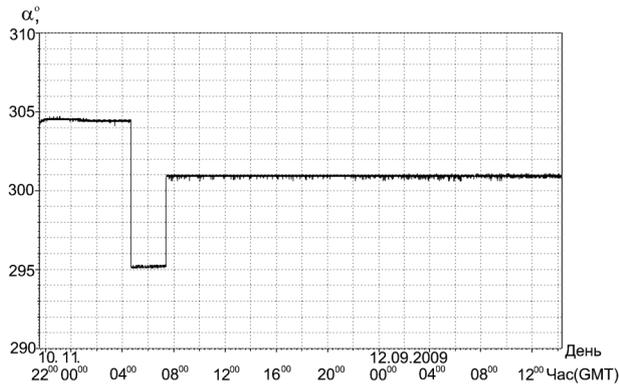


Рис. 4. Временные измерения в экспериментальной скважине «Родыгино» 10–12 сентября 2009 г. (α – угол поворота скважинного прибора)

записи GMT+11 ч.

11 сентября в 4⁴⁵ ч произошел поворот корпуса скважинного прибора (угол α) с 305 до 295° (рис. 4) и обратный поворот в 7²⁰ ч до 301°.

На рис. 5 представлено поведение кривых в момент поворота, которое фиксируется изменением уровня записи горизонтального акселерометра (U_2). В этот же момент отмечаются локальные всплески

акустических сигналов на всех частотах, а затем начинается бухтообразное изменение суточного хода высокочастотных компонент ГАЭ (Z_2, Z_4), а уровень низкочастотной компоненты (Z_1) остается неизменным. С запозданием около полутора часов с момента поворота прибора фиксируется увеличение амплитуды колебаний электромагнитной эмиссии на частоте 80 кГц, изменение высокочастотной компоненты ЭМИ (F_3) практически незаметно.

Поворот скважинного прибора, возможно, был вызван изменением газогидрохимических условий в скважине, что явилось откликом на изменение геодинамической обстановки в районе, что, в свою очередь, подтверждается аномалиями ГАЭ и ЭМИ. В последующие несколько суток записи значения импульсов ЭМИ и составляющих ГАЭ низкочастотного диапазона (H_1, Z_1) относительно стабильны.

Повторные измерения в этой же скважине были выполнены в 2010 г. с 12⁰⁰ ч (GMT) 24 сентября до 24⁰⁰ ч (GMT) 28 сен-

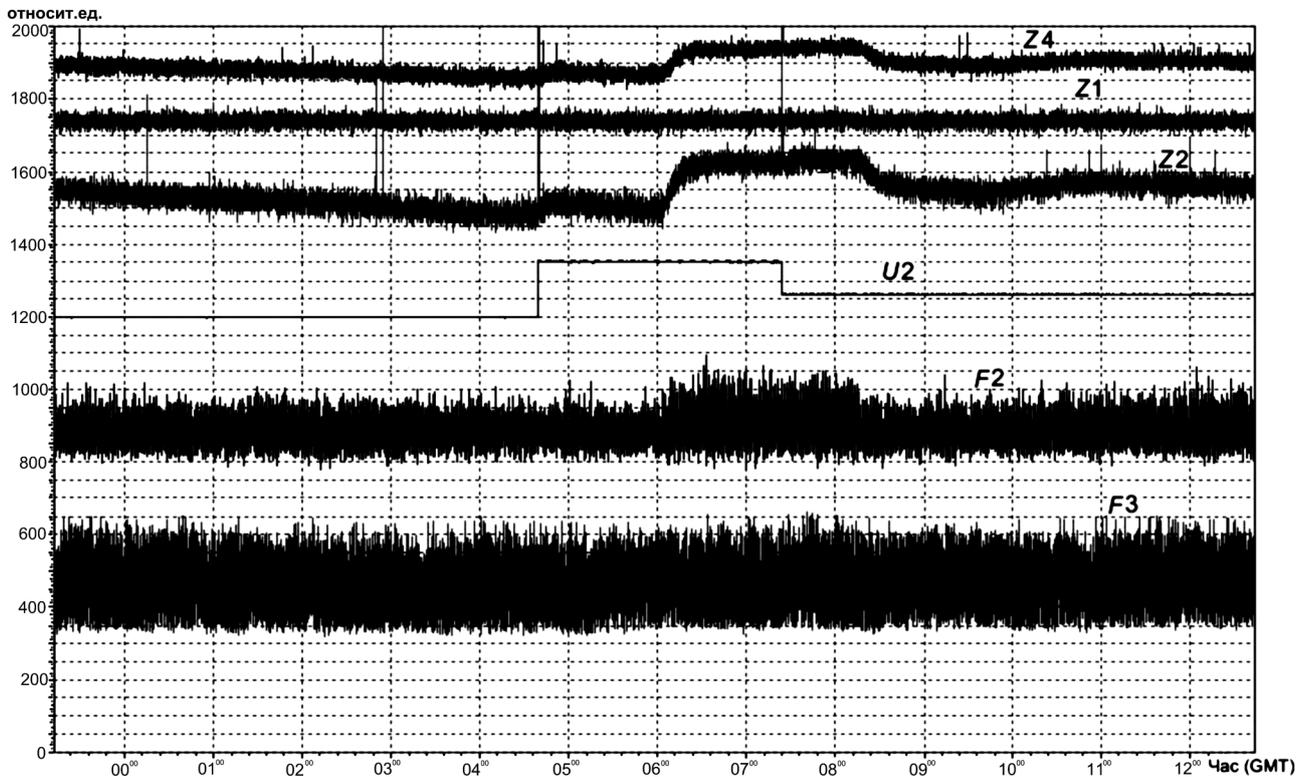


Рис. 5. Поведение кривых ГАЭ и ЭМИ в момент поворота скважинного прибора 11.09.09

Таблица. Сейсмические события в районе Камчатского полуострова

№ точки	Дата	Время	Глубина, км	Расстояние от точки наблюдений, км	Магнитуда
1	23.09.10	12:08:30	169	63	4,6
2	25.09.10	23:53:07	81	84	4,6
3	27.09.10	06:58:42	41	189	4,3
4	29.09.10	06:37:47	59	105	4,5

тября. В сентябре этого года в районе Камчатского полуострова произошло несколько сейсмических событий. Данные приведены в таблице.

При регистрации электромагнитного излучения на частоте 45 кГц (*F1*) никаких изменений не наблюдается (рис. 6).

Для электромагнитного излучения на частоте 120 кГц (*F3*) в период с начала наблюдений до 3⁰⁰ ч (GMT) 25.09.10 отмечается уменьшение среднего уровня записи. Небольшое увеличение уровня записи наблюдается в 6⁰⁰ ч (GMT) 25.09.10. В последующем уровень среднего фона остается практически постоянным, но увеличиваются амплитуда колебания. В это же время происходит увеличение среднего уровня

записи электромагнитного излучения на частоте 80 кГц (*F2*) и, далее, до конца регистрации этот уровень постепенно уменьшается, но наблюдается появление импульсов разной амплитуды и длительности.

Наибольшая частота появления кратковременных всплесков отмечается перед сейсмическими событиями 25 и 27 сентября. Пачки импульсов с большой амплитудой и длительностью зафиксированы с 6⁰⁰ до 24⁰⁰ ч (GMT) 28.09.10.

Изменение среднего уровня записи электромагнитного излучения *F2* и *F3* в период 24–25 сентября, возможно, связано с откликом на сейсмическое события 23 сентября, прошедшего в непосред-

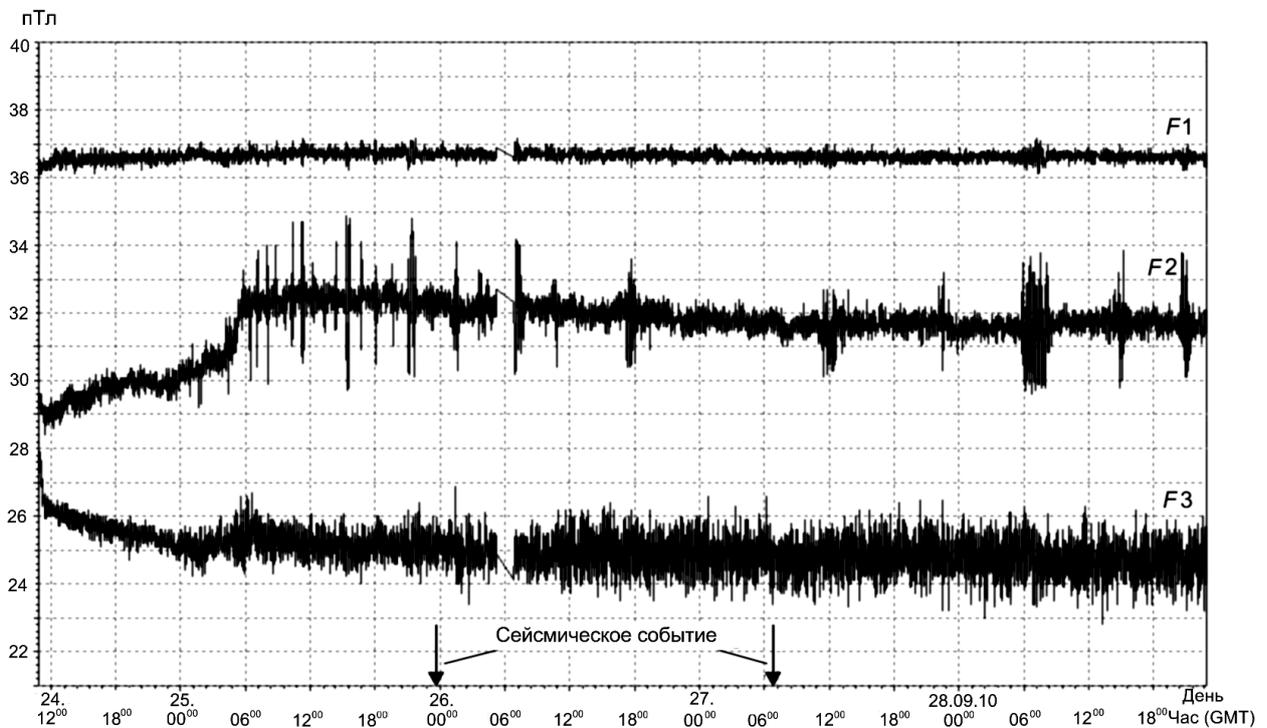


Рис. 6. Временные измерения электромагнитной эмиссии в экспериментальной скважине «Родыгино» 24–28 сентября 2010 г.

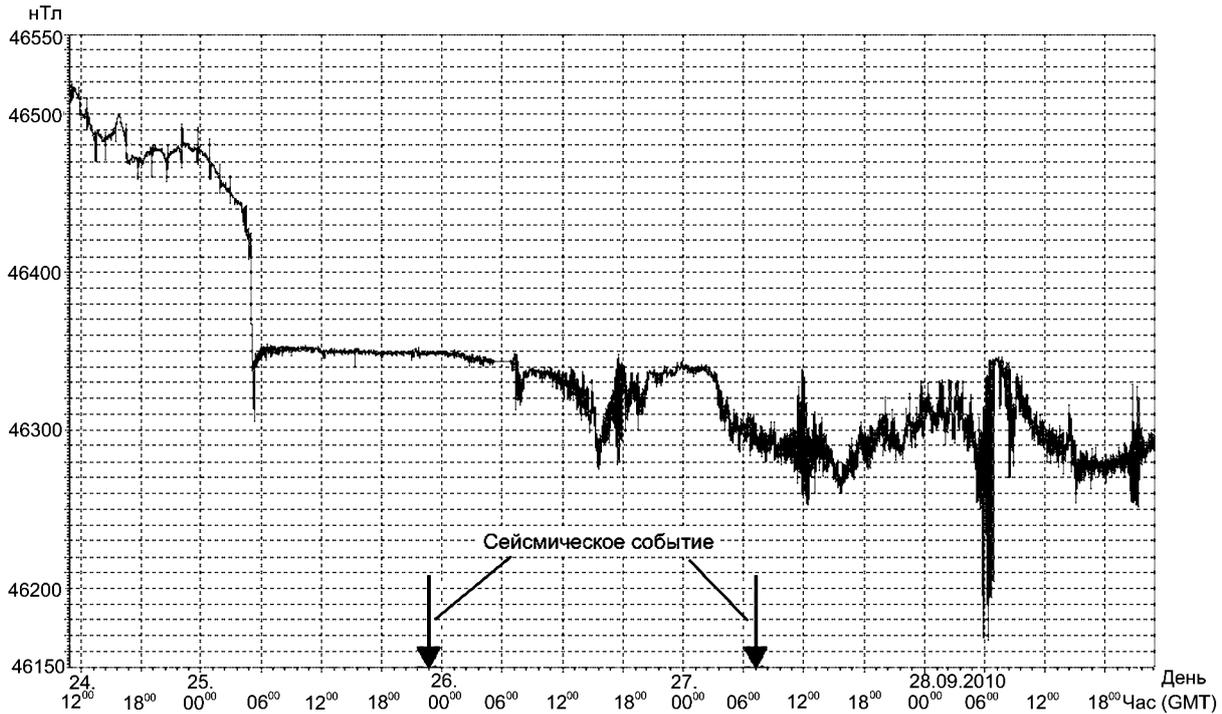


Рис. 7. Временные измерения вертикальной составляющей (Z) геомагнитного поля в экспериментальной скважине «Родыгино» 24–28 сентября 2010 г.

ственной близости к пункту наблюдения.

Аналогичные явления отмечались и ранее при регистрации электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах на Камчатке и других регионах (Гохберг и др., 1988; Гаврилов, Богомолов, 2007), а также при технологических взрывах и горных ударах (Беспалко, Яворович, 2009).

Временная диаграмма вертикальной составляющей геомагнитного поля (рис. 7) хорошо коррелируется с сигналами ЭМИ на частоте 80 кГц ($F2$). В тот же момент, когда резко повышается уровень кривой $F2$ (с 04 до 05 ч 25 сентября), на диаграмме Z , напротив, наблюдается резкое снижение уровня сигнала. Последующим затем сейсмическим событиям 25 и 27 сентября предшествуют интервалы покоя на диаграмме Z и короткопериодных пульсаций – на диаграмме $F2$ (см. рис. 6).

Пульсации сигналов $F2$ с большими периодами, которые наблюдаются в 7⁰⁰ и 18⁰⁰ ч (GMT) 26 сентября; в 12⁰⁰ и 23⁰⁰ ч (GMT) 27 сентября; в 6⁰⁰, 14⁰⁰ и 21⁰⁰ ч (GMT) 28 сентября, хорошо коррелируются с вариациями геомагнитного поля.

Заключение

Таким образом, при изучении геодинамического состояния горных пород в скважинах комплексирование методов измерения магнитных и акустических параметров позволяет получать дополнительную информацию о деформационных процессах, происходящих в районе исследования, и более уверенно производить расчленение геологического разреза по прочностным свойствам.

Анализ данных, полученных при режимных наблюдениях с комплексным прибором МЭШ-42, позволяет выделить наиболее информативные параметры для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород. К ним относятся акустические сигналы на частотах выше 500 Гц, сигналы электромагнитной эмиссии на частоте 80 кГц и вариации геомагнитного поля.

Работа выполнена в рамках инициативного проекта № 12-У-5-1044.

Литература

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А. Комплексная магнитометрическая аппаратура для исследования сверхглубоких и разведочных скважин. Екатеринбург:

УрО РАН, 2012. 120 с.

Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.

Беспалько А.А., Яворович Л.В. Физическое моделирование механоэлектрических преобразований в образцах горных пород // Электромагнитная эмиссия геосфер: Межд. научная конф. Становление и развитие научных исследований в высшей школе, посвященная 100-летию со дня рождения проф. А.А. Воробьева. Томск, 2009. С. 306–313.

Гаврилов В.А., Богомолов Л.М. К вопросу о влиянии электромагнитных полей естественного происхождения на уровень геоакустической эмиссии // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: Тр. рег. научно-техн. конф. Т. 1. Петропав-

ловск-Камчатский, 2008. С. 59–63.

Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 116 с.

Пат. 2123711 (РФ). Устройство для измерения геоакустических шумов в скважине / Ю.Г. Астраханцев, А.К. Троянов, 1998.

Пат. 2173778 (РФ). Способ обнаружения зон трещиноватости пород в скважинах / Ю.Г. Астраханцев, А.К. Троянов, 1999.

Пат. 2445653 (РФ). Устройство для проведения геоакустического каротажа / Ю.Г. Астраханцев, А.К. Троянов, 2012.

Троянов А.К., Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., Гаврилов В.А., Белоглазова Н.А. Сейсмоакустическая эмиссия и электромагнитное излучение трещиноватых пород в скважинах // ДАН. 2011. Т. 436. № 1. С. 118–120.