

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ДАННЫМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

И.А. Санина, С.Б. Турунтаев, Э.М. Горбунова, Н.А. Барышников,
Е.В. Зенченко, М.А. Нестеркина, Н.Л. Константиновская
Институт динамики геосфер РАН, e-mail: irina@idg.chph.ras.ru

Введение

Комплексные исследования, проводимые в Институте динамики геосфер, направлены на разработку фундаментальных основ методов определения пространственно-временных изменений фильтрационных свойств коллекторов месторождений углеводородов на основе анализа данных пассивного микросейсмического мониторинга.

К основным задачам исследований относятся:

- Разработка методики проведения лабораторных экспериментов по изучению течения несмешивающихся жидкостей с разной вязкостью под действием градиента давления.
- Создание лабораторных установок и проведение предварительных экспериментов по изучению условий коагуляции трещин в проницаемых породах.
- Разработка методики создания модельного материала и проведения лабораторных экспериментов для изучения связи микросейсмической эмиссии с вариациями порового давления и напряженно-деформированного состояния коллектора.
- Экспериментальные исследования гидрогеологического отклика на техногенное сейсмическое воздействие.

В настоящее время в нашей стране широко вводятся в разработку месторождения нефти с трудноизвлекаемыми запасами. Для эффективной эксплуатации таких месторождений особую значимость приобретает совершенствование методов извлечения углеводородного сырья на основе использования результатов научно-технических исследований, направленных на повышение нефте- и газоотдачи пластов.

Изучение явлений, возникающих на границах вязких несжимаемых жидкостей в пористых средах, важно для понимания ряда природных и технологических процессов. Примерами таких процессов являются взаимодействие нефти и подземных вод, заводнение нефтегазового коллектора, проникновение буровых растворов в

прискважинное пространство и др. Флюидизация пористых массивов жидкостями, различающимися по вязкости, приводит к формированию нового физического объекта, обладающего собственными уникальными свойствами. Структура твердой матрицы контролирует кинематику течений разновязких несмешивающихся жидкостей в пористой среде. Это многообразие типов флюидонасыщенных массивов ограничивает возможности численного моделирования подобных процессов. Проведение натурных исследований по ряду причин зачастую невозможно. Ввиду этого важнейшую роль в исследованиях явлений, возникающих при контакте разновязких несмешивающихся жидкостей в пористой среде, играет лабораторное моделирование.

Процессы, происходящие в коллекторах при извлечении нефти, недоступны прямому наблюдению. Одним из немногих проявлений изменения напряженно-деформированного состояния и коллекторских свойств пласта являются слабые сейсмические события.

Лабораторные эксперименты на моделях флюидонасыщенных коллекторов

В целях изучения условий устойчивости водонефтяного контакта в ИДГ РАН был выполнен ряд опытов по вытеснению вязкой жидкости из пористых сред. В качестве модели нефтегазового коллектора использовалась ячейка Хеле-Шоу, пространство между пластинами которой было заполнено пористым веществом. Перед началом каждого эксперимента ячейка заполнялась вязкой жидкостью (минеральным маслом), после чего под действием фиксированного перепада давления в поровое пространство подавалась вытесняющая, менее вязкая жидкость – вода. В процессе эксперимента проводились непрерывная фиксация картины вытеснения, измерение расхода и суммарного объема закачиваемой жидкости, перепада давления на концах ячейки. В результате исследований установлено, что при прямолинейно-параллельном вытеснении до момента прорыва вытесняющей жидкости к стоку течение носит сильно неоднородный характер. На первом этапе эксперимента вытесняющая фаза, которая характеризуется меньшей вязкостью по отношению к заполняющей поровое пространство жидкости, продвигается вдоль потока в виде отдельных струй, при этом значительные области порового пространства, содержащие более вязкую фазу, остаются не затронутыми (рис. 1). Следует заметить, что расход закачиваемой жидкости растет как до, так и после момента прорыва струйного лидера к стоку.

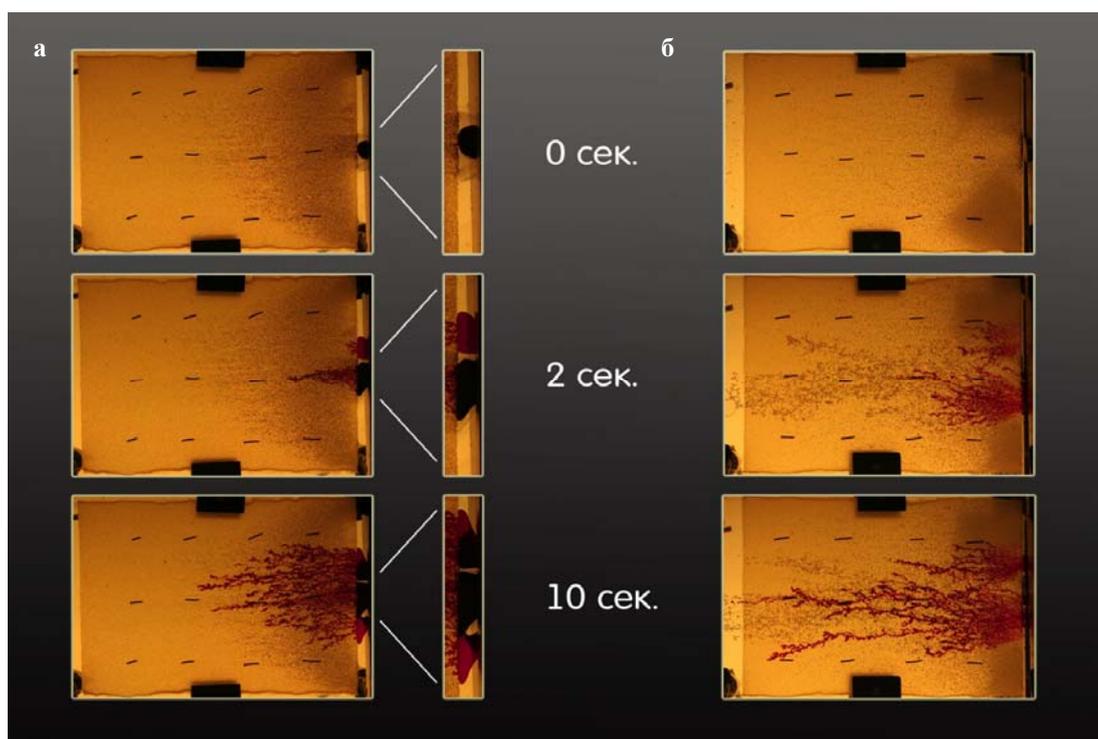


Рис. 1. Влияние осаждения частиц на проницаемых стенках на устойчивость фронта вытеснения вязкой жидкостью: а – вытеснение водой с частицами; б – вытеснение водой без частиц. Показано время от начала эксперимента, вода подкрашена, на вставках представлены увеличенные фрагменты проницаемой границы

Вторая серия экспериментов направлена на изучение взаимодействия течений в пористой среде двух несмешивающихся жидкостей и вытеснения одной жидкостью другой. Особенность экспериментов заключается в том, что вытесняющая жидкость представляет собой суспензию (взвесь), характерные размеры мелких твердых частиц которой много меньше размеров пор. Основную часть экспериментальной работы предлагается провести на оригинальной лабораторной установке. В качестве модели нефтегазового коллектора будет использоваться тонкий слой кварцевого песка с характерным размером частиц 0.3 мм, расположенный между двумя параллельными, оптически прозрачными пластинами (ячейки Хеле-Шоу). Нефть, содержащуюся в пласте, предлагается моделировать при помощи минерального масла, закачиваемого в модель коллектора перед началом каждого эксперимента. В качестве вытесняющей жидкости будет использоваться вода либо водный раствор глицерина, содержащий твердые частицы с заданными характерным размером и объемной долей. Предполагается, что частицы взвеси, осаждаясь

в объеме порового пространства, будут приводить к изменению ее фильтрационных свойств.

Серия предварительных экспериментов была проведена на модели, представленной слоем поролона, зажатым между двумя параллельными прозрачными пластинами и заполненного маслом, в который внедрялась водная суспензия с размером частиц порядка одной десятой характерного размера пор пористого слоя (см. рис.1а) и вода без частиц (см. рис.1б).

Опыты показали, что при вытеснении масла суспензией время прорыва струйного лидера к устью ячейки примерно в два раза превосходит то же время, измеренное в опыте без частиц. После прорыва струйного лидера расход вытесняющей жидкости в опыте с частицами растет примерно в два раза быстрее, чем расход в опыте без частиц. При этом в опыте с частицами поровое пространство «окрашивалось» струями вытесняющей жидкости быстрее, чем в опыте без частиц. Со временем расходы переставали расти, происходило насыщение порового пространства водой. Время насыщения в опыте с частицами оказалось примерно в три раза меньше, чем в опыте без частиц. По-видимому, эта разница объясняется локальным уменьшением проницаемости среды в результате коагуляции порового пространства частицами суспензии в местах возникновения первоначальных струй вытесняющей жидкости, что привело к более равномерному распределению струй воды по ширине ячейки. Разница в темпах роста расходов вытесняющих жидкостей может свидетельствовать о более эффективном вытеснении вязкой жидкости на этапе заводнения в опыте с вытесняющей суспензией.

Экспериментальная основа оценки проницаемости

Микросейсмические события связаны с пространственными и временными изменениями напряженного состояния горных пород и являются одним из основных источников информации о деформационных процессах в недрах и о миграции флюидов в пористых породах. Изменение порового давления в результате добычи углеводородов или закачки флюидов нередко сопровождается появлением сейсмических событий той или иной мощности. В ряде работ продемонстрирована возможность использования данных о распространении «облака» микросейсмических событий, индуцированных закачкой жидкости в проницаемые горные породы, для оценки проницаемости коллекторов [Shapiro et al, 2002, 2006; Rothert and Shapiro, 2003]. Было показано, что в пороупругом приближении для изотропной пористой среды распространение критического значения

порового давления (величина давления, при достижении которой возникает сейсмическое событие) может быть оценено при помощи следующего выражения:

$$r = \sqrt{4\pi Dt} \quad , \quad (1)$$

где r – расстояние от точки закачки, D – коэффициент гидравлической диффузии, t – время от начала закачки. Выражение (1) получается из решения уравнения пьезопроводности, которое описывает эволюцию порового давления в пористой среде с упругим скелетом и представляет собой, по сути, уравнение диффузии (или теплопроводности) вида [Щелкачев, 1959]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D\nabla^2 p \quad . \quad (2)$$

В предположении, что закачка начинается в момент времени $t=0$, давление в точке закачки мгновенно возрастает до некоторой величины и поддерживается постоянным, среда бесконечна, однородна и изотропна, уравнение (2) приводит к выражению для изобар вида (1). Таким образом, строя графики распространения микросейсмических событий в координатах $r-t$ и находя для получаемого «облака» событий наилучшую огибающую вида (1), которая соответствует критическому значению порового давления, индуцирующего сейсмические события, можно оценить величину коэффициента гидравлической диффузии D , что, в свою очередь, позволяет оценить проницаемость среды k , воспользовавшись связью

$$D = \frac{k}{\mu_0 \beta m_0} \quad , \quad (3)$$

где μ_0 – вязкость флюида, β – сжимаемость пористой среды, m_0 – пористость среды.

На лабораторной установке в ИДГ РАН были выполнены исследования по разработке метода использования данных по изменению микросейсмической активности в некотором объеме пористой среды для оценки проницаемости данного объема. С этой целью была создана экспериментальная установка, состоящая из длинного (1060 мм) стального бруса прямоугольного сечения (117×82.5 мм), в котором фрезерованием произведена выемка прямоугольного сечения размером 65×62.5 мм (рис. 2). Сформированный резервуар закрывается толстой прямоугольной крышкой, между крышкой и резервуаром располагается резиновая диафрагма. Вдоль боковых стенок и дна установки имеется ряд отверстий для размещения датчиков давления, силы и акустической эмиссии. На торцах резервуара расположены отверстия для нагнетания

жидкости и сброса давления; подводящие и отводящие трубки оборудованы электрическими клапанами. Внутренние боковые поверхности резервуара покрыты листами резины толщиной 3.5 мм для уменьшения «жесткости» стенок и для достижения желаемого соотношения вертикальных и горизонтальных компонент напряжений.

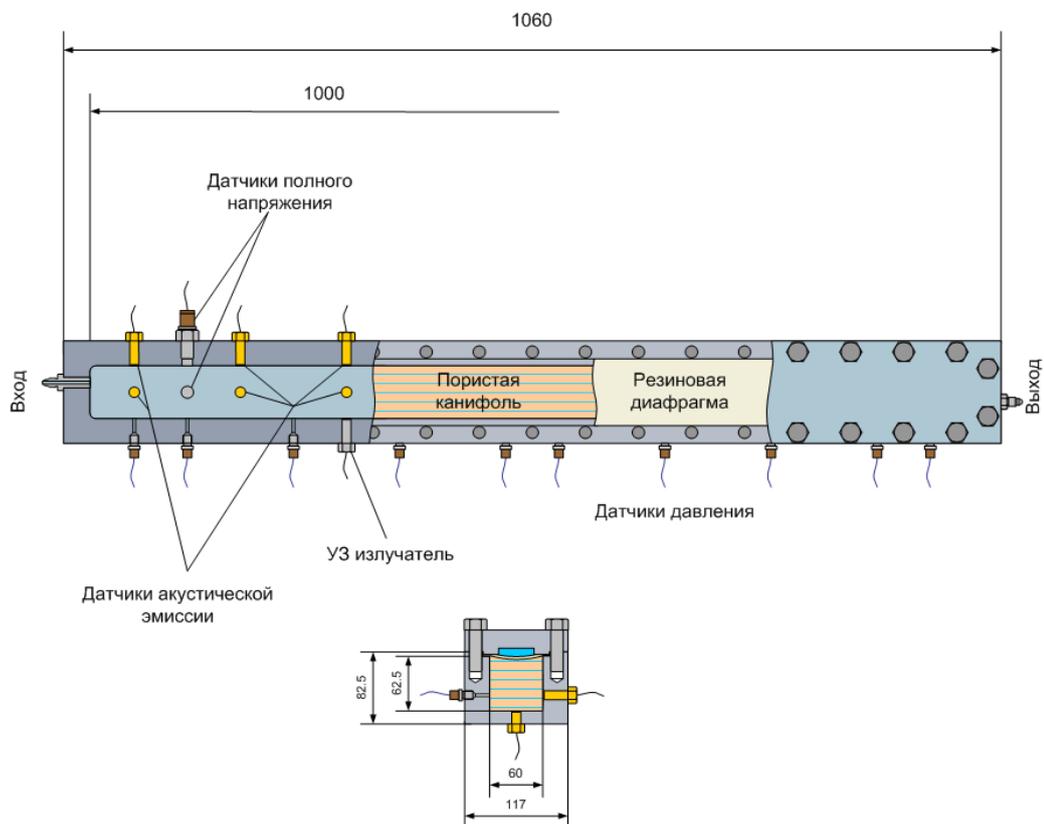


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования связи между изменением порового давления и микросейсмичностью

В экспериментах лоток заполняли смесью гальки (размером от 2.5 до 5 мм) с дробленой канифолью (размер фрагментов от 1 до 5 мм) в пропорции 1:3. Данную смесь спрессовывали путем нагнетания воды в пространство между крышкой резервуара и резиновой диафрагмой. В зависимости от приложенной нагрузки получаемые пористые образцы имели проницаемости от 10 до 20 мД. Собранную установку вакуумировали и заполняли дистиллированной водой.

Десять датчиков давления были размещены в точках на расстояниях 50, 110, 170, 230, 350, 410, 530, 650, 830 и 950 мм от входного отверстия. Изменение давления регистрировалось при помощи АЦП, размещенного в компьютере, частота оцифровки

составляла 10 Гц. Двенадцать пьезокерамических датчиков АЭ были размещены на боковых стенках установки на расстояниях 50, 110, 170, 230, 290 и 410 мм от входного отверстия. На расстояниях 50, 170 и 290 мм находились группы из трех датчиков, расположенных в боковых стенках и в дне. Импульсы АЭ усиливались согласующими предусилителями и оцифровывались высокоскоростной АЦП с частотой дискретизации 800 КГц. Верхняя частота полосы пропускания предусилителей при коэффициенте усиления 100 была выбрана существенно ниже частоты Найквиста. Записи АЭ были синхронизованы с записями давления.

В одной серии экспериментов в модельный резервуар закачивалась вода с постоянным расходом $0.35 \text{ см}^3/\text{с}$. В другой серии экспериментов поровое давление в ячейке с закрытым стоком поднималось до величины 10–11 МПа, после чего резервуар оставался под таким давлением в течение трех часов, затем давление сбрасывалось путем открывания клапана на стоке.

На рис. 3 показано распространение импульсов АЭ во времени вдоль модельного резервуара в эксперименте по увеличению порового давления. Точки соответствуют времени и координатам импульсов АЭ, линия – аппроксимация фронта распространения АЭ зависимостью (1), коэффициент гидравлической диффузии, рассчитанный в соответствии с (3), равен примерно $1100 \text{ мм}^2/\text{с} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Видно,

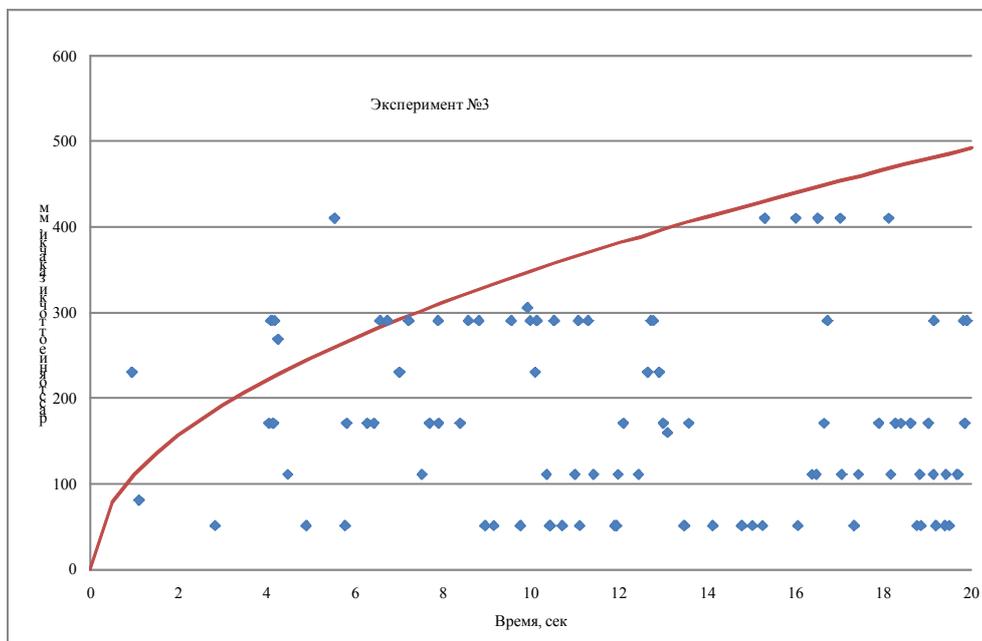


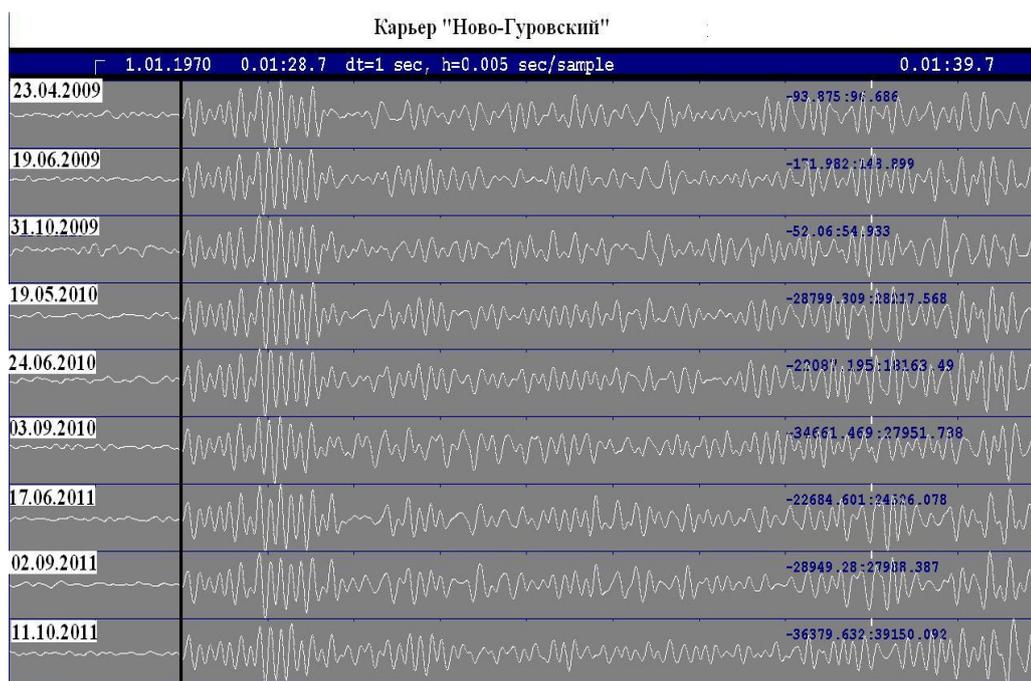
Рис. 3. Связь между временем возникновения импульса АЭ и его расстоянием от точки заправки жидкости

что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретической зависимостью. Таким образом, предлагаемый подход позволяет расширить возможности метода, предложенного С. Шапиро с коллегами [Shapiro et al., 2002, 2006], и применять его в случае неоднородных сред, используя не только информацию по распространению фронта микросейсмических событий в пространстве, но и данные об изменении микросейсмической активности во времени.

Натурные эксперименты на территории ГФО «Михнево»

На базе геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») проводятся исследования по изучению микросейсмического фона и мониторингу подземных вод.

В течение трех лет регистрировались сейсмические волны взрывов на карьере Новогуровский. Карьер расположен в 65 км от ГФО «Михнево». Записи взрывов на этом карьере были выбраны вследствие высокой стабильности волновых форм Р и S (рис. 4), что подтверждено более чем 8-летними наблюдениями. Был проведен детальный спектральный анализ всей записи и установлено, что, несмотря на постоянство формы записи, в коде волны Р происходят временные изменения, особенно четко проявляющиеся



Полосовой фильтр 0,5-10Гц

Рис. 4. Волновые формы взрывов на карьере Новогуровский, полученные на центральном приборе малоапертурной сейсмической группы «Михнево»

в полосе частот 6–9 Гц. На рис. 5 представлены волновые формы и спектрально-временные зависимости для различных взрывов в 2010 г.

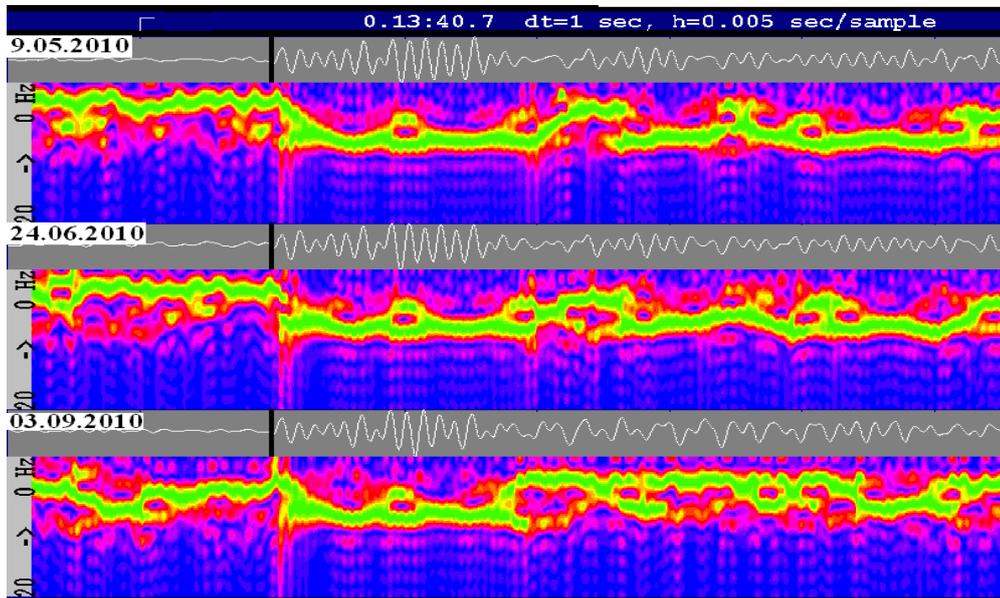


Рис. 5. Спектрально-временные характеристики сигнала в 2010 г. Вверху – запись взрыва, ниже – временная спектрограмма для каждого события

На данном рисунке хорошо видно, что после стабильной в частотном отношении части, связанной с вступлением Р-волны, происходит понижение частот регистрируемых волн. На рис. 6, где представлены результаты за 2011 г., картина подобная, но наблюдается повышение частот со временем.

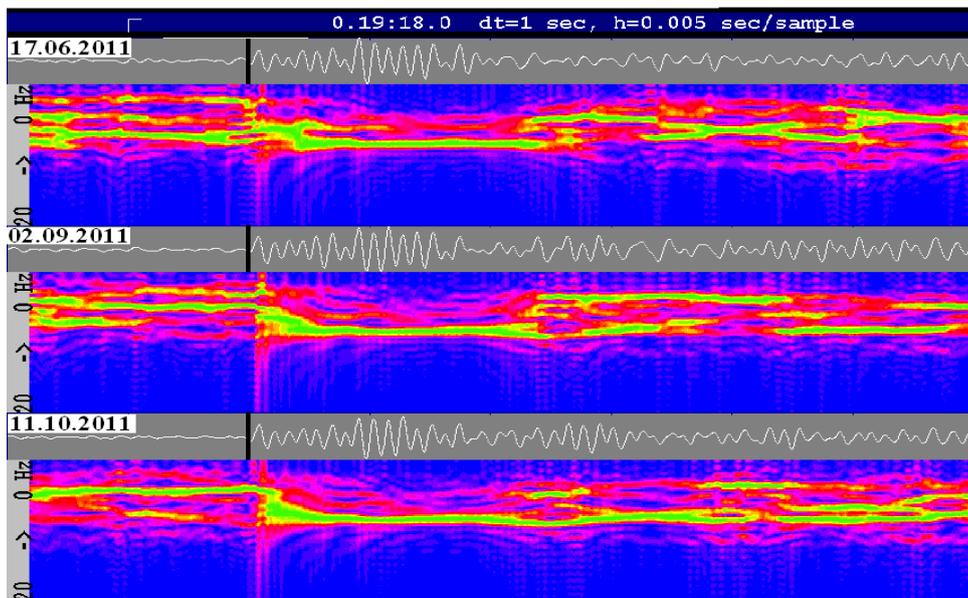


Рис. 6. Спектрально-временные характеристики сигнала в 2011 г.

Одновременно с сейсмическими наблюдениями на территории ГФО «Михнево» проводится мониторинг режима подземных вод по двум водоносным горизонтам – каширском и алексинско-протвинском.

Совместный анализ данных, отраженных на рис. 7 и 8, показал, что имеется корреляция между вариациями уровня подземных вод и частотно-временными вариациями в сейсмической записи в определенном интервале частот. По данным поляризационного анализа, вариабельная часть записи представлена в основном поверхностными волнами, которые, как известно, являются суперпозицией продольных и поперечных волн. Поперечные волны более чувствительны к водонасыщенности среды, чем продольные, что может объяснить изменение спектра при вариациях уровня подземных вод. Полученный результат, безусловно, требует дальнейшего исследования и увеличения числа наблюдений, в то же время он показывает возможности использования удаленных источников для изучения вариаций состояния массива при изменении флюидонасыщенности.

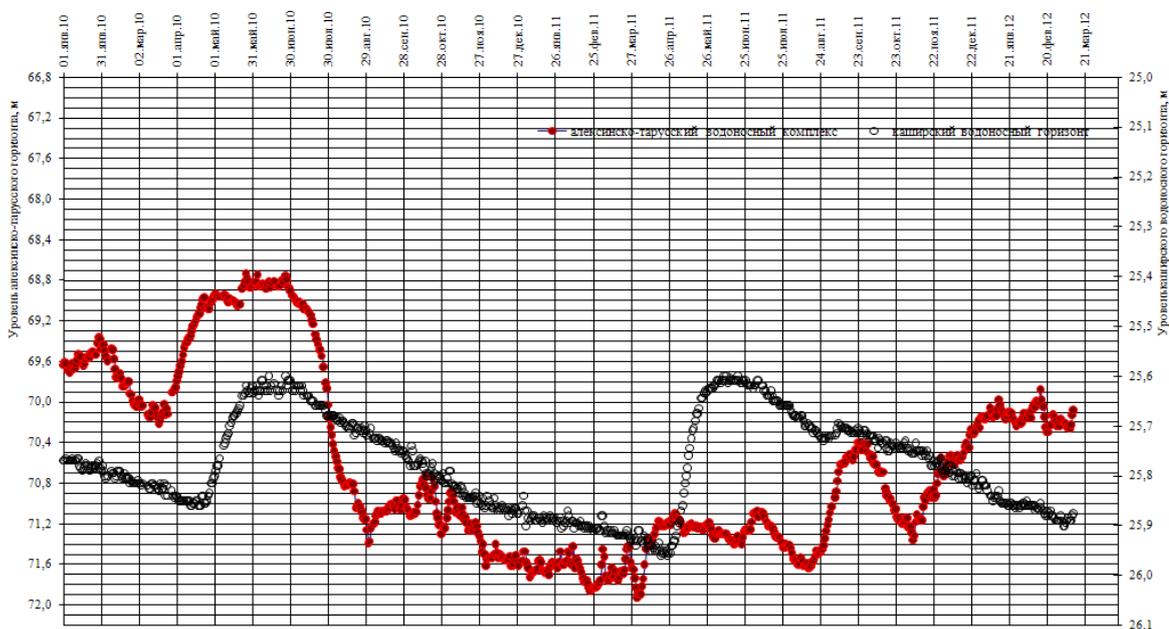


Рис. 7. Вариации уровня подземных вод (черная линия – каширский водоносный горизонт, красная – алексинско-протвинский)

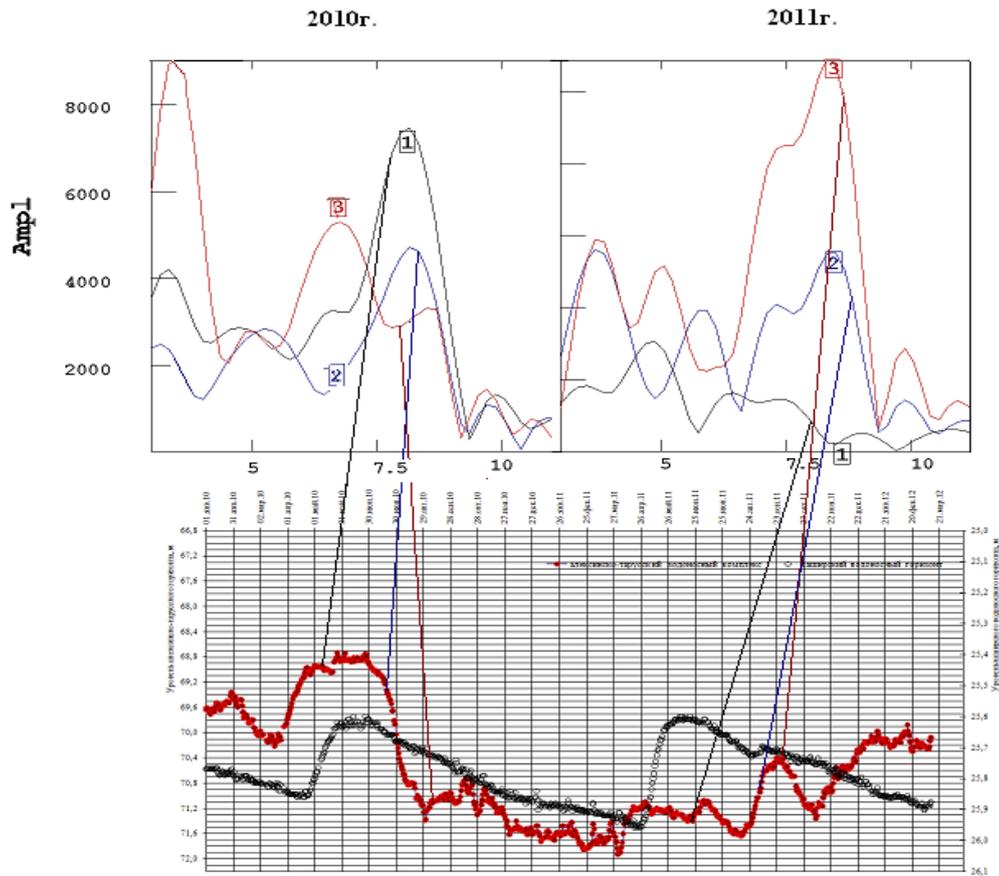


Рис. 8. Корреляция уровня подземных вод со спектральной амплитудой сейсмических волн в полосе частот 6–9 Гц. Цифры – номера записей и спектров на рис. 5 и 6

Заключение

В результате выполненных исследований были апробированы лабораторные установки и разработаны методики для изучения особенностей течения разноточных многофазных жидкостей в проницаемых средах для определения условий коагуляции трещин, изучения связи вариаций микросейсмической активности с изменением порового давления и проницаемости коллектора.

Регистрация микросейсмических событий (пассивный сейсмический мониторинг) и правильная интерпретация получаемых данных позволяют выявить активные разломы, зоны трещиноватости, изменение проницаемости коллекторов в процессе разработки месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

- Щелкачев В.Н.* Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М.: Гостоптехиздат, 1959. 467 с.
- Shapiro S.A., Rothert E., Rath V., Rindschwentner J.* Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity // *Geophysics*, 67, 212-20, 2002.
- Shapiro S.A., Dinske C., Rothert E.* Hydraulic-fracturing controlled dynamics of microseismic clouds // *Geophysical Research Lett.*, 33, L14312, 2006. doi:10.1029/2006GL026365.