

УДК 550.34:534.22

ПОИСК УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫЗВАННОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СКВАЖИНАХ

© 2005 г. В. В. Дрягин, О. Л. Кузнецов*, А. А. Стародубцев, В. Е. Рок*

ЗАО Интенсоник & К,
620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

E-mail: dryagina@sky.ru

*ВНИИГеосистем,
113105 Москва, Варшавское шоссе, 8

Поступила в редакцию 01.11.04 г.

Впервые показано, что обнаруженная закономерность отклика пористой насыщенной среды на сейсмоакустическое волновое поле большой интенсивности может быть положена в основу новой комплексной технологии, позволяющей эффективно решать задачу обнаружения углеводородов и воды в прискважинной части пласта и селективно восстанавливать фильтрационные характеристики пластов.

Процессы переноса и преобразования энергии в многокомпонентной и гетерофазной пористой геологической среде сопровождаются сейсмоакустической и электромагнитной волновой эмиссией, которая может служить источником информации о нелинейных свойствах такой среды, о ее составе и о протекающих в ней механических, геохимических и электромагнитных процессах [1]. В ряде работ обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований изменений сейсмоакустической активности геосреды, вызванной искусственным внешним воздействием на нее.

Акустическая эмиссия (АЭ) в сложно построенной гетерогенной среде может быть вызвана упругим импульсом, который провоцирует явление скачкообразного проскальзывания на контактах блоков и приводит к обогащению упругих колебаний высокими частотами. Увеличение амплитуды и частоты колебаний происходит перед последним этапом разрушения горных пород и в процессе роста трещин. В этих работах показано, что амплитуды упругих колебаний активных блоков горного массива на характерных квазирезонансных частотах могут в 2–3 раза превышать амплитуды внешнего возбуждения [2, 3] за счет высвобождения части ранее запасенной в среде энергии.

Вибросейсмическое воздействие с земной поверхности на месторождения нефти, которое применяется в технологии повышения нефтеотдачи пластов, также основано на излучении и переизлучении упругой энергии в широком диапазоне частот.

Разными авторами приводятся описания механизмов преобразования упругой энергии в горном массиве, которые основаны на взаимодействии статических напряжений горного массива с упругими колебаниями в локальных очагах, обладающих наибольшей концентрацией напряжений или насыщенных углеводородами, изменяющими локальные условия взаимодействия твердых элементов среды в зонах их контактов. В работах Института горного дела СО РАН, [4] представлена концепция преобразования сейсмической энергии от виброисточника на поверхности земли к продуктивному пласту. При этом последовательно возникают колебания геологических блоков на их резонансных частотах 10–30 Гц в диапазоне. В свою очередь резонансные колебания геологических блоков в условиях напряженного состояния вызывает их распад и генерирование звука в высоком диапазоне частот 10–30 кГц, то есть приводит к акустической эмиссии. Объемная плотность акустической энергии на каждом этапе преобразования значительно возрастает за счет энергии напряженного состояния горных пород и служит причиной разрушения различного рода фильтрационных экранов, препятствующих протеканию флюидов по капиллярам пористой среды. Наряду с решением задачи повышения дебита скважин сейсмическим методом, в этой работе обсуждается возможность поиска зон повышенной нефтенасыщенности и их мониторинга в процессе разработки месторождения. В основе нашего метода лежит анализ сейсмоакустической эмиссии в широком частотном диапазоне, от сейсмических частот до ультразвуковых частот.

Возбуждение акустической эмиссии в геологической среде при воздействии упругими волнами низкой частоты в частности связывается с раскрытием пор за счет микроразрывов горной породы под действием переменного давления. При этом трансформация упругой волны при прохождении вглубь Земли сопровождается возбуждением колебаний в широком спектре частот: от инфразвуковых до гиперзвуковых [5]. В работе [6] предложена концепция сейсмической акустической эмиссии (САЭ), которая является высокочастотным шумовым откликом трещиноватой среды на деформацию. При этом диапазон такого отклика распространяется от сейсмических частот (15–300 Гц), до высокочастотной акустической эмиссии (более 1 кГц). Авторы показали, что аномальные вариации САЭ, кроме причин тектонического происхождения, могут быть связаны с изменениями динамических условий флюида в трещиноватой среде.

В теоретической работе [7] исследованы механизмы усиления ультразвуковых колебаний в коллекторах блочной структуры при вибрационном воздействии с поверхности Земли. Выделяют три этапа воздействия: передача слабых гармонических колебаний к блокам коллектора, возникновение микроколебаний блоков в потоке флюидов и образование упругих резонансных колебаний, вызывающих излучение ультразвука в окружающую жидкость. Возникающие ультразвуковые колебания способны разрушать загустевшие нефтяные пленки в межблочных контактах коллектора, что способствует достижению технологического эффекта восстановления проницаемости пласта и фильтрации нефти. Таким образом, трансформация энергии от низких частот к высоким частотам, через вынужденные колебания блоков, приводит к генерации звуковых волн в межблочном флюиде с интенсивностью вплоть до нескольких десятых долей Вт/см², которых достаточно для разрушения пленок и восстановления фильтрации жидкости. Частотный диапазон колебаний составляет сотни и первые тысячи герц.

В технологии прямого поиска месторождений “Анчар” используется отклик залежи углеводородов на виброволновое воздействие с поверхности Земли [8]. По этой технологии, колебания в геологической среде создаются при помощи сейсмического вибратора, который работает в течение 3 минут. Сравнение сигналов, записанных сейсмоприемниками до и после вибровоздействия, дает информацию о наличии залежи углеводородов. Существование этого патента, состоит в том, что геологическая среда, содержащая углеводороды, реагирует на виброволновое воздействие вторичным излучением, которое возникает сразу же после воздействия и продолжается еще некоторое время после его прекращения. Примеча-

тельно, что частота, на которой регистрируют это излучение, лежит в том же диапазоне инфразвуковых частот, что и частота излучения вибратора, а именно (1–4) Гц. Авторы этого метода ссылаются на высказывания академика РАН М.А. Садовского и члена-корреспондента РАН А.В. Николаева, сделанные ими еще в 1982 году, о том, что геологическая среда производит сейсмическую эмиссию, и что внешнее воздействие стимулирует источники микросейсмического шума. Особенно интенсивно эти источники проявляются в области нефтегазовых залежей.

В патенте [9] также описан метод регистрации естественной и вызванной сейсмоакустической эмиссии при возбуждении сейсмических колебаний для целей разведки нефтегазовых месторождений. В этой работе, как и в работах других авторов, используется информация о динамике вызванной сейсмоакустической эмиссии для анализа наличия углеводородов в подземной формации.

Проведенные нами исследования акустической эмиссии в скважине показали, что эмиссия может быть вызвана акустическим воздействием, которое применяется для восстановления проницаемости прискважинной зоны пластов и использует волновое поле большой интенсивности – (8–10) Вт/см² [10, 11].

Метод акустического воздействия на прискважинную зону пластов предназначен для восстановления проницаемости насыщенного порового пространства, причем как в ближней зоне, так и в удаленной зоне пласта. По результатам проведенных гидродинамических исследований, после акустического воздействия по всей толще работающих пропластков на одном из месторождений Пермской области было зафиксировано увеличение проницаемости призабойной зоны на (80–130) процентов, а удаленной зоны на (40–160) процентов. По этим данным можно судить о глубине изменений свойств насыщенной пористой среды под действием акустического поля с указанной начальной интенсивностью.

Для записи сигнала сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в процессе выполнения работ по акустическому воздействию в скважинный прибор был установлен акустический датчик, приемная и регистрирующая аппаратура. Работа аппаратуры была запрограммирована на выполнение цикла: записи сигнала эмиссии, акустического воздействия и повторной записи сигнала эмиссии для каждой точки в заданном интервале по глубине скважины. По принятой в геофизике терминологии этот метод можно назвать каротаж сейсмоакустической эмиссии (КСАЭ) в цикле каротаж – акустическое воздействие – каротаж (КВК). Объединение двух функций: мощного акустического воздействия и регистрации сигналов САЭ в одном приборе позволило получить информацию об из-

менении этого сигнала по разрезу скважины в продуктивном пласте и за его границами, как непосредственно до и после акустического воздействия, так и в процессе мониторинга сигналов САЭ во времени.

Обнаружено, что после акустического воздействия на околоскважинное пространство происходит изменение САЭ. Тот факт что, наибольший вклад в изменения САЭ вносят именно свойства жидкости, которая находится в данный момент в поровом пространстве коллектора, подтверждается другими методами геофизических исследований скважин (ГИС). Геофизические исследования проводились в комплексе работ по контролю за разработкой месторождения по методике: приток-состав. Установлено, что в коллекторе, насыщенном нефтью или газом, после акустического воздействия наблюдалось увеличение сигнала САЭ по сравнению с исходным значением, а в коллекторе, насыщенном водой, наблюдалось его снижение.

Известно, что акустическое воздействие [12, 13] на флюидонасыщенный коллектор приводит к изменению ряда свойств и состояния флюида: разгазированию нефти, увеличению подвижности флюида, уменьшению вязкости, изменению фазового состояния углеводородов и т.д. Очевидно, что эти изменения коррелируют с изменениями величины полной энергии спектра САЭ и однозначно связаны с характером насыщенности коллектора.

Методика исследования текущей насыщенности коллекторов, проводимая по принципу КВК, заключалась в регистрации и анализе изменений сигналов САЭ, а также установлении связи этих изменений с характером флюида, насыщающего в данный момент околоскважинное пространство продуктивного пласта, и который можно проконтролировать при помощи независимых методов исследования скважин.

Для этого на заданной глубине скважины производилось измерение сигнала САЭ и его частотный анализ в звуковом и ультразвуковом диапазоне программно-аппаратным комплексом акустического воздействия ААВ-400 [14, 15]. Далее, с помощью акустических излучателей осуществляли в каждой точке скважины силовое акустическое воздействие на околоскважинное пространство. Непосредственно после окончания акустического воздействия повторно измеряли и записывали сигнал САЭ. Вычисляли полную энергию сигнала после воздействия и до него, а также их разность.

Несмотря на то что, залежи нефти и газа изначально обладают аномально высоким уровнем сейсмоакустических шумов, динамика вторичного излучения преобладает над фоном и развивается в двух противоположных направлениях: в случае нефтенасыщенного коллектора вторичное

излучение увеличивается, а в случае водонасыщенного – уменьшается. Именно эта физическая особенность вторичного излучения и легла в основу предлагаемой технологии избирательного восстановления проницаемости пласта, в которой интегрированы в одной операции два метода – исследования характера насыщенности пласта и селективного воздействия на пласт интенсивным акустическим полем.

Возможности реализации этого метода с целью восстановления проницаемости прискважинного пространства показаны на примере работ по акустическому воздействию в скважинах Быстринского месторождения в Западной Сибири. Объектом исследований были два участка пласта этого месторождения, отстоящие друг от друга примерно на 10 км. В обеих скважинах проводились работы по исследованию продуктивности стандартным комплексом ГИС при плановом подземном ремонте.

До начала акустического воздействия была сделана запись фонового сигнала сейсмоакустической эмиссии по разрезу скважины, охватывающего зону перфорации и прилегающие к нему интервалы кровли и подошвы. Одновременно с регистрацией сигналов САЭ производилась их обработка при помощи программы быстрого преобразования Фурье (БПФ) и наблюдение волновой картины сигналов, их спектров в диапазоне частот от 10 Гц до 22 кГц в реальном времени с различной степенью усреднения. Запись и обработка сигналов производилась для каждой точки выбранного разреза, которые использовались затем для построения каротажной спектрограммы и каротажных кривых интегралов полной энергии спектра сигналов САЭ в заданных частотных диапазонах.

Процесс акустического воздействия (АВ) состоял из пробных циклов кратковременного воздействия и последующей немедленной регистрации сигналов САЭ для каждой точки выбранного интервала в скважине, с последующим анализом динамики величины этих сигналов.

Так, для скважины № 1125, которая географическими методами была определена как дающая приток воды, из исследуемого интервала, получены сигналы САЭ до и после акустического воздействия. Пример сигнала САЭ зарегистрированного в середине продуктивного пласта на глубине 2049.5 м, до и после акустического воздействия, а также разность спектров этих сигналов, показаны на рис. 1. Сигналы обработаны при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) с полным усреднением спектров за все время регистрации, которое составляло (15–30) секунд.

На рисунке: а) фрагмент сигнала САЭ до АВ, б) фрагмент сигнала САЭ после АВ, в) разность спектров сигналов измеренных до и после АВ.

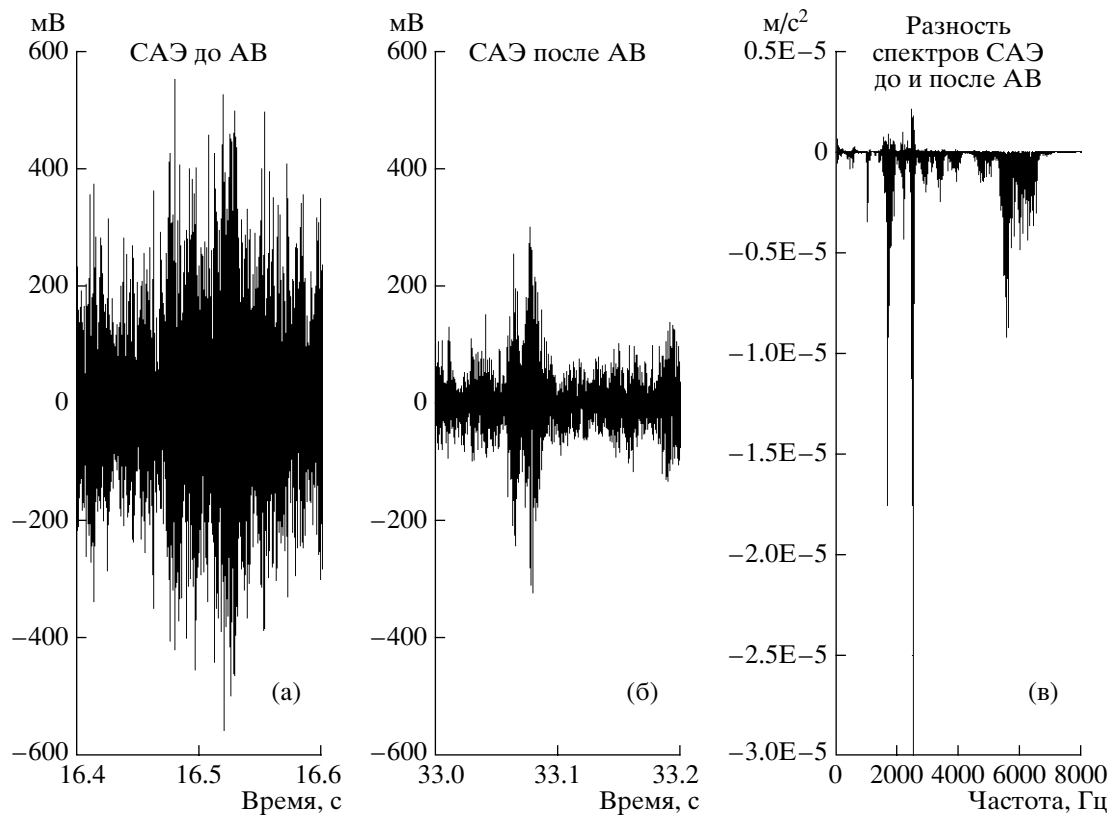


Рис. 1. Сигналы САЭ и разность их спектров до и после АВ в скважине № 1125 с водонасыщенным коллектором.

Амплитуда сигналов измерена на выходе регистрирующей скважинной аппаратуры, амплитуда гармоник спектрального анализа рассчитана в единицах ускорения в соответствии с чувствительностью датчика и коэффициентов передачи системы регистрации.

Аналогичные исследования проводились на скважине № 1964 (рис. 2) того же месторождения, на которой накануне были выполнены работы по геофизическому контролю ее производительности. Увеличение сигнала САЭ после АВ происходит во всем интервале продуктивного пласта, причем вклад в полную энергию сигнала и в его изменение, как и на предыдущей скважине, вносят, главным образом, высокочастотные составляющие спектра, от 1 кГц до 7 кГц.

Исходные спектры сигналов САЭ, измеренные в этих двух скважинах одного и того же пласта, похожи друг на друга и отражают его характерные особенности. В тоже время динамика сигналов после акустического воздействия имеет противоположное направление, причем величина этого изменения составляет существенное значение. Для скважины № 1125 с водонасыщенным коллектором разница в изменении полного интеграла энергии САЭ для указанной глубины составляет в сторону уменьшения в 4.4 относи-

тельно фонового значения, а в скважине № 1964 с нефтенасыщенным коллектором эти изменения происходят в сторону увеличения энергии САЭ в 1.96 раза, для указанной глубины.

Необходимо отметить, что исследования в этих двух скважинах проводили при создании кратковременной депрессии на пласт, что способствовало созданию условий притока жидкости из пласта в скважину. При этом не исключалась возможность включения в состав регистрируемого сигнала, составляющей, которая возникала за счет фильтрации жидкости в поровом пространстве и в перфорационных отверстиях. Анализ таких сигналов проводился в работе [16] по исследованию информативности акустического и электромагнитного шума, вызванного процессами фильтрации флюидов в пластах.

Однако, эксперименты, проведенные нами в пьезометрических, контрольных, задавленных и неперфорированных скважинах, где была исключена фильтрация жидкости в поровом пространстве, были получены такие же результаты. Например, контрольная скважина № 20020, месторождения Бавлы, Татарстан. В этой неперфорированной скважине были проведены исследования на характер насыщенности коллектора и сделано сравнение результатов метода КСАЭ со

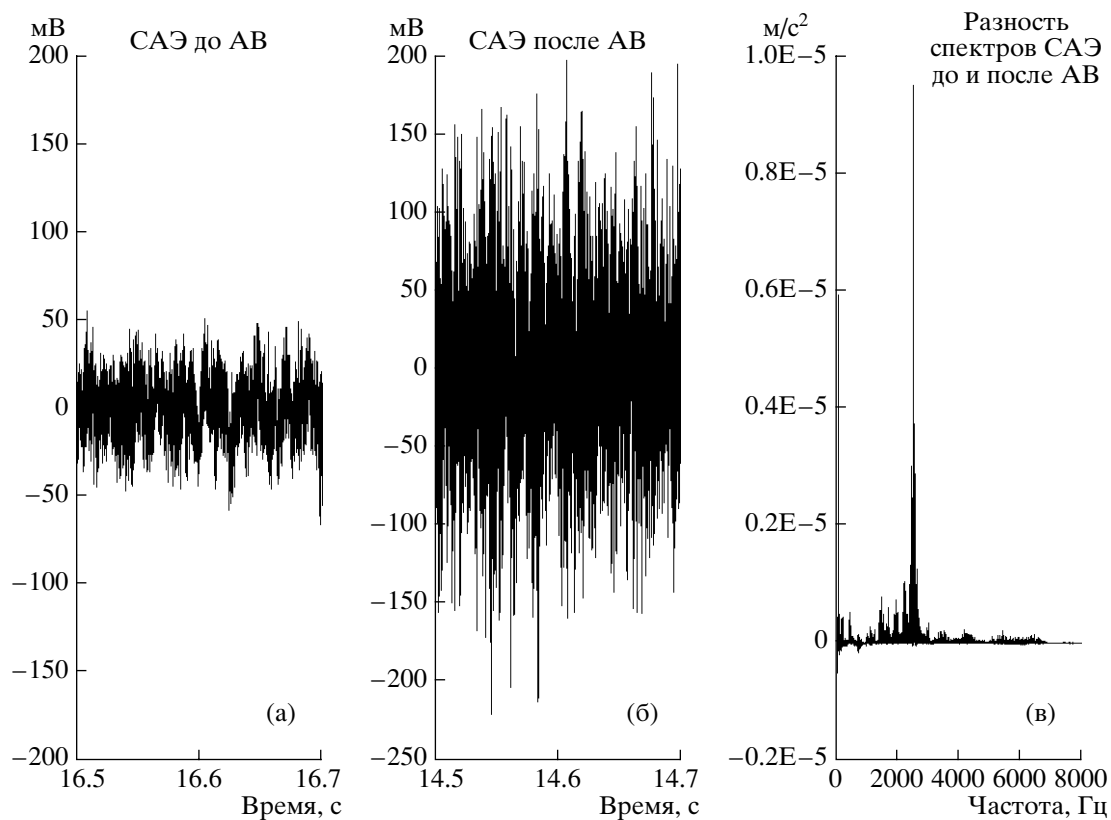


Рис. 2. Сигналы САЭ и разность их спектров до и после АВ в скважине № 1964 с нефтенасыщенным коллектором. Пример записи сигнала САЭ в середине продуктивного пласта на глубине 2064.5 м. Обозначения к рисунку, такие же как и на рис. 1.

всеми имеющимися геофизическими данными. В частности, в пласте, который ранее был определен как “слабая нефть”, обнаружена сильная аномалия вызванной САЭ (рис. 3). Аномалия сигнала САЭ представляла собой импульсы с высокочастотным заполнением и частотой повторения примерно (3–7) Гц, аналогично тем, которые регистрируются на дневной поверхности в технологии “Анчар”.

В последующем проверка показала, что после перфорации этого пласта в другой скважине был получен приток нефти. Подобные результаты были получены нами и на других месторождениях в Западной Сибири, Казахстане и Республики Коми.

Для определения величины сигнала САЭ в процессе выполнения технологии КСАЭ, в программе используемой нами аппаратуры была предусмотрена возможность вычисления энергии сигнала в заданном частотном диапазоне, который принимался полностью или определялся при помощи экспертной оценки на основании предварительного анализа сигналов в реальном времени. Величина вычисленной энергии сигнала в заданной точке записи сигнала записывалась в каротажную диаграмму синхронно с движением прибора вдоль скважины.

Таким образом, формировалась каротажная диаграмма, принятая в стандарте ГИС и позволяющая проводить сравнительный анализ полученных данных со всеми материалами предыдущих исследований скважин (рис. 4). Из диаграммы видно, что вне интервала, обозначенного как коллектор, сигналы фоновой записи САЭ и после акустического воздействия почти одинаковые, а вот в середине этого интервала отмечается хорошее совпадение сильной аномалии сигнала САЭ с данными стандартного каротажа, которые характеризует пласт как нефтенасыщенный.

Общий алгоритм выделения интервалов насыщенности по данной методике можно представить на основе примера выделения нефтенасыщенного участка пласта и водонасыщенного участка, в одной скважине. По сути, это определение водо-нефтяного контакта (ВНК) залежи, которое имеет большое значение в решении геолого-промышленной задачи разработки месторождения (рис. 5).

В соответствии с алгоритмом последовательно производятся операции по записи и вычислению САЭ до и после акустического воздействия, затем вычисляется абсолютная и относительная разница энергий сигнала САЭ с учетом статистическо-

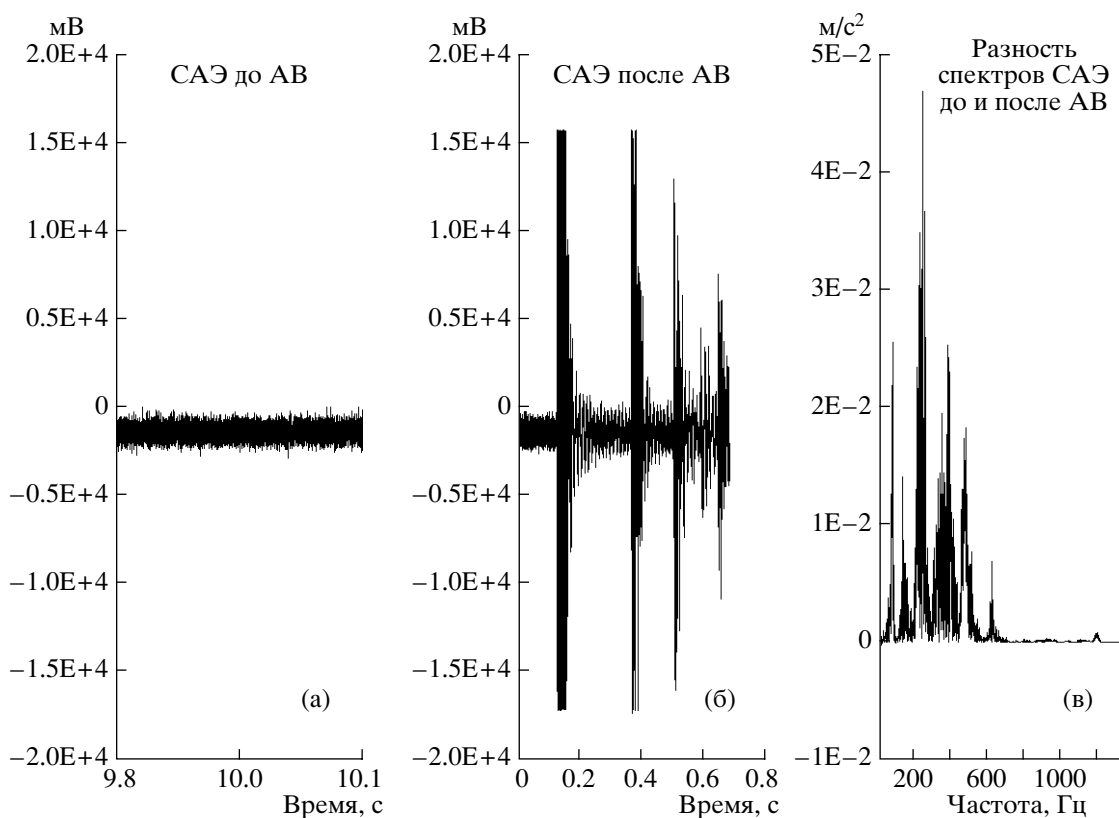


Рис. 3. Сигналы САЭ и разность их спектров до и после АВ в скважине № 20020, месторождение Бавлы, с нефтенасыщенным коллектором, глубина 1754 м. Обозначения к рисунку, такие же, как и на рис. 1.

го разброса фона. Величина разброса фонового значения зависит от общей тектонической обстановки и поэтому является индивидуальной для каждого месторождения и составляет величину от долей процента до десяти процентов. Поэтому за величину сигнала САЭ принимаются только такая величина, которая превышает этот разброс (графики “Нефть” и “Вода” на рис. 5). Коэффициент нефтенасыщенности вычислялся по графику “Нефть”, причем максимальное значение на нем принималось равным абсолютному значению коэффициента нефтенасыщенности, который был определен другим методом ГИС или был известен по какому-либо другому эталону.

Фон – энергия сигнала САЭ, вычисленная для каждой точки по глубине скважины до акустического воздействия, АВ – энергия сигнала после акустического воздействия, Р_абс – абсолютное значение разности энергии сигнала до и после АВ, Р_отн – разность энергии относительно фонового значения, Нефть – положительная относительная разность энергий уменьшенная на величину статистического разброса фонового значения САЭ, Вода – соответственно отрицательная разность, Кн_эталон – коэффициент нефтенасы-

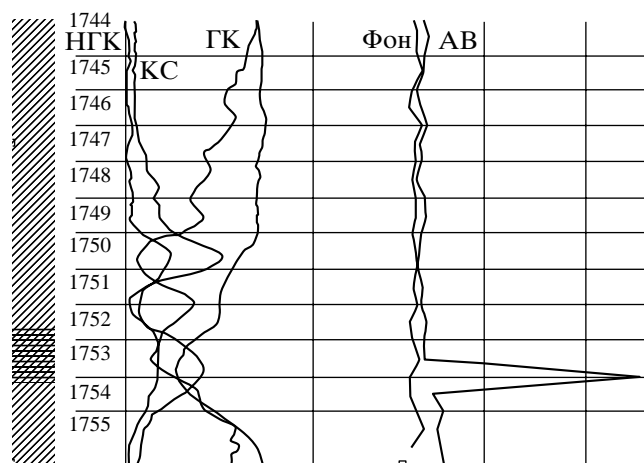


Рис. 4. Каротажная диаграмма результатов исследования скважины № 20020, месторождения Бавлы. Обозначения: НГК – нейтронный гамма-каротаж, КС – каротаж кажущегося сопротивления, ГК – гамма-каротаж, Фон – фоновая запись сигнала САЭ до акустического воздействия, АВ – запись сигнала САЭ после акустического воздействия. В левой части показана геологическая колонка, с указанием пласта – коллектора и глубина.

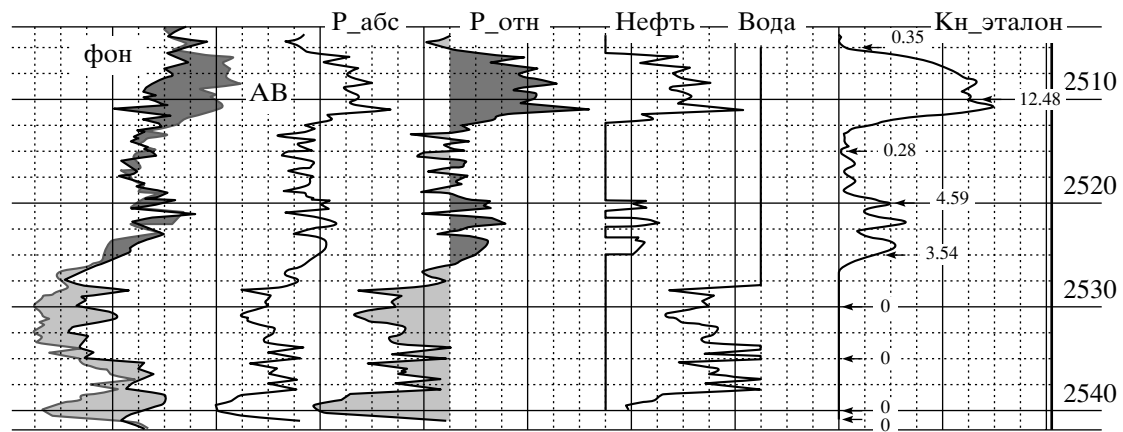


Рис. 5. Граф обработки сигналов САЭ в технологии КСАЭ. Обозначения на рисунке.

ценности, вычисленный по графику “Нефть”, относительно известного эталона, полученного другим геофизическим методом.

Графики, приведенные на рис. 5, получены на скважине № 141 Мамонтовского месторождения, Западная Сибирь, и сравнивались с данными ГИС по окончательному и радиоактивному каротажу, а также по электрокаротажу через обсадную колонну (ЭКОС). При этом каротаж производился в новых неперфорированных интервалах, с целью сравнения методов определения насыщенности пластов – коллекторов. Результаты пробной перфорации полностью подтвердили оценку насыщенности пласта по методу КСАЭ.

В связи с тем, что такой эффект наблюдался во всех без исключения скважинах, где проводились данные исследования и где можно было однозначно подтвердить характер насыщенности, можно сделать вывод о применимости данного способа для оценки характера насыщенности коллектора. В качестве критерия оценки характера насыщенности коллектора, предлагается использовать разность между значениями полной энергии сигнала САЭ после акустического воздействия на околоскважинное пространство и до воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы геофизики XXI века. Сборник научных трудов в двух книгах под редакцией члена-корреспондента РАН А.В. Николаева. М.: Наука, 2003.
2. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С. 72–78.
3. Сбоев В.М. Исследование динамических процессов в массиве горных пород на глубоких подземных предприятиях // Известия АН СССР, сер. “Физика Земли”. 1982. № 10. С. 57–61.
4. Симонов Б.Ф., Опарин В.Н., Канискин Н.А., Чередников Е.Н., Кадышев А.И., Масленников В.В. Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности // Нефтяное хозяйство. 2000. № 5. С. 41–46.
5. Белоненко В.Н., Павлов М.В., Макуров А.Д., Фомичев В.Ф., Тищенко И.В. Результаты применения вибросейсмической технологии на Суторминском месторождении. Нефтепромысловое дело. 2000. № 8–9. С. 18–22.
6. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., Видмонт Н.А. Проблема предсказания землетрясений: результаты, обсуждение, предложения // Вестник ОГГТГН РАН. 2000. Т. 1. № 2(12). С.
7. Алексеев А.С., Цецохо В.А., Белоносова А.В., Белоносов А.С., Сказка В.В. Вынужденные колебания трещиновато-блочных флюидонасыщенных слоев при вибросейсмических воздействиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Геомеханика. 2001. № 6.
8. Арутюнов С.Л., Лошкарев Г.Л., Графов Б.М., Сиротинский Ю.В., Новицкий М.А., Немтарев В.И., Кузнецов О.Л., Шутов Г.Я., Резуненко В.И., Черненко А.М. Способ вибросейсморазведки при поиске нефтегазовых месторождений. – Патент № 2045079; МПК: 6 G01V1/00; 1992.04.01.
9. Бутенко Г.А., Михайлов В.А., Тикшаев В.В. Способ сейсмической разведки при поисках нефтегазовых месторождений. – Патент РФ № 2105324; МПК: G01V1/00 1998.
10. Дрягин В.В. Исследование динамики вызванной акустической эмиссии для оценки характера насыщенности коллектора // НТВ “Каротажник”, 2002. № 98.
11. Митрофанов В.П., Дзюбенко А.И., Нечаева Н.Ю., Дрягин В.В. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1998. № 10.
12. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. С.
13. Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтяные пласты. М.: Мир, 2001. 260 с.

14. Дрягин В.В., Кузнецов О.Л. Технология обнаружения и извлечения углеводородов на основе их реакции на волновое воздействие // Научно-технический журнал "Технологии ТЭК". 2003. № 5(12).
15. Продукция ЗАО "Интенсоник & К" – Научно-технический вестник АИС "Каротажник" № 45, 46, 55, 64, 98, 107, 1998–2003 гг.
16. Ипатов А.И., Городнов А.В., Петров Л.П., Шумейко А.Э., Скопинцев С.П. Апробация метода анализа амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при оценке фильтрации флюидов в породах // Научно-технический вестник Каротажник. 2004. № 9(122). С. 51–66.