

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД.
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.8:553.9:622.31

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ
НЕФТЕПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

© 2013 г. В. В. Дрягин

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН

E-mail: vvdryagin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2013 г.

Представлены результаты исследования сейсмоакустической эмиссии, возникающей в нефтенасыщенной пористой геологической среде при силовом акустическом воздействии в скважине. Показано, что динамические нелинейные процессы в продуктивном пласте активизируются при внешнем упругом воздействии на залежь и как следствие изменяют энергетическое состояние среды, которое отражается в изменении акустической эмиссии. Определена корреляция высокочастотной составляющей акустической эмиссии с низкочастотной составляющей, которая свидетельствует о развитии процесса в пространстве на разномасштабных уровнях.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, акустическое воздействие, нефтенасыщенная пористая среда, плотность потока энергии, эмпирические моды, проницаемость коллектора.

DOI: 10.7868/S0320791913050067

Разработка способов поиска и детализации обнаружения углеводородов при разработке месторождений методами нелинейной геофизики, основанными на изменении свойств насыщенной пористой среды под действием физических полей, получило в последнее время новые и достаточно убедительные данные. Эти материалы получены в результате промыслово-геофизических работ методом исследования вызванной энергоактивности пластов коллекторов.

Эмиссия упругой энергии в пласте обусловлена естественными процессами, а также вызванными различными видами искусственного воздействия на него. Исследования свойств этой энергии в различных геологических условиях позволили выявить параметры эмиссии, однозначно связанные с наличием углеводородов и возможностью их извлечения.

Источником акустической эмиссии в данном случае служит область продуктивного пласта, подвергнутая облучению таким силовым акустическим полем, параметры которого эффективно влияют на изменение фильтрационно-емкостных свойств. Причем, как показали результаты независимых гидродинамических испытаний, эти изменения происходят как в ближней зоне пласта, так и в удаленной [1]. Из этого следует, что источник акустической эмиссии также может располагаться в этих зонах, что особенно важно для оценки истинного насыщения продуктивного пласта.

Сейсмоакустическая эмиссия (САЭ) представляет собой процесс излучения упругих волн в результате обратимых или частично обратимых из-

менений структуры твердых тел под влиянием внешних и внутренних факторов различной физической природы, таких как локальные перераспределения напряжений, образование новых трещин, дегазация, изменение фазового состояния и химического состава пород. В кристаллических массивах существование САЭ связано с процессом образования новых трещин. В флюидонасыщенных средах наряду с упругими процессами могут возникать и гидродинамические причины [2–10].

Значительно ранее было дано определение САЭ как фундаментального свойства горных пород *in situ* [11, 12], которая обладает способностью постоянно действующего излучения. Одна из основных отличительных особенностей эмиссии — это отражение релаксаций напряжений и высокая чувствительность к внешним воздействиям, а также широкомасштабность и широкая полоса излучения. В частности, в работах отмечается высокая чувствительность сейсмической эмиссии к изменению пластового давления при вибросейсмическом воздействии на залежь. Приводятся данные о САЭ как диагностическом признаке увеличения нефтеотдачи пласта при искусственном воздействии на него, приведен пример различной эмиссионной реакции пластов коллекторов и не-коллекторов, как в фоновом режиме регистрации, так и после вибровоздействия. Указывается на неоднородность шумового процесса САЭ в виде импульсных сигналов с сильным изменением их параметров: плотности потока и амплитуды, которые происходят на фоне

небольшого изменения среднего уровня шума. Причем значительные изменения этих параметров отмечаются в нефтяном пласте при инициирующем вибровоздействии наземным вибратором.

Такую “вибросчувствительность среды” авторами предлагается использовать в качестве параметра для расчета интенсивности искусственного воздействия с целью инициирования САЭ для увеличения нефтеотдачи пласта. Таким образом, вероятно, это одна из первых работ, где был предложен метод анализа динамики САЭ для оценки нефтенасыщенности и управления нефтеотдачей месторождения. На чем же основана концепция определения таких важных характеристик нефтеносной залежи по результатам изучения ее сейсмоакустической эмиссии?

Выводы, сделанные в работе [11], указывают на сложный характер связи пространственной вариации САЭ со структурными особенностями горных пород, реологическими свойствами и напряженным состоянием. При этом указывается, что нефтяные коллекторы, обладая высоким сейсмоэмиссионным потенциалом и временной устойчивостью процесса, создают “перспективу развития методов поиска и разведки нефти, основанных на использовании естественной и наведенной САЭ”, которая имеет общее название “эмиссионная томография”. Еще одна особенность САЭ, отмеченная в этой работе, и получившая подтверждение в наших работах по технологии исследования САЭ в скважинах, связана с изменениями фильтрационно-емкостных свойств насыщенной пористой среды под влиянием акустического воздействия в скважине.

Здесь впервые предлагаются две модели вибровоздействия на среду: первая – это известные в литературе механизмы непосредственного действия вибрации от специального источника, а в качестве второй предлагается модель опосредованного действия на среду. Суть ее заключается в том, что искусственные вибрации возбуждают в среде вызванную сейсмоакустическую эмиссию, которая в свою очередь локально воздействует на эффективную проницаемость и вязкость нефти в небольшой области объема среды мощным акустическим полем. Тем самым второй механизм воздействия объясняет получение широкомасштабного технологического эффекта воздействия во времени и в пространстве пласта.

Результаты промысловых испытаний акустического воздействия при помощи аппаратуры акустического воздействия ААВ-400 на месторождениях Пермской области показали увеличение коэффициента проницаемости $K_{пр}$, ближней зоны пласта на 80–130% и удаленной зоны пласта на 4–145% [1] с адекватным увеличением дебита добывающих скважин и продолжительностью эффекта в среднем 6 месяцев. В этих работах исследование эмиссии не проводилось, но в

последующих работах при исследовании САЭ использовались акустические излучатели такого же типа с аналогичной удельной мощностью излучения.

Объединение двух функций – излучение мощного акустического поля и прием слабых эмиссионных сигналов в скважине в течение одного технологического цикла, позволило получить новую качественную информацию об энергетических процессах в коллекторах и их связи с наличием и извлечением нефти [13, 14].

Аналогичные результаты были получены нами при исследовании вызванной акустической эмиссии на ряде месторождений РФ при решении задачи определения насыщенности продуктивных коллекторов. На рис. 1 и 2 приведены фрагменты сигналов САЭ в нескольких интервалах продуктивных пластов в скважине Тевлинско-Рускинского месторождения в Западной Сибири. Записи сигналов САЭ произведены по всему интервалу залежи пласта БС10 (2–3). Он включает семь отдельных пластов коллекторов с различной насыщенностью, которую необходимо было оценить через неперфорированную обсадную колонну. Геологическое задание состояло в выборе предстоящего интервала перфорации. На рис. 1 приведена запись САЭ в фоновом режиме, после чего произведено облучение прискважинного пространства скважинным акустическим излучателем с интенсивностью не менее 8 Вт/см². Непосредственно после этого воздействия произведена повторная запись САЭ, рис. 2.

Динамические процессы, вызванные акустическим воздействием (АВ) в насыщенной флюидами горной среде, отражаются в характере изменений параметров САЭ в процессе облучения силовым акустическим полем. Излучение акустического поля и прием сигналов САЭ производится устройствами, расположенными в одном скважинном геофизическом приборе, который может перемещаться по стволу скважины в процессе исследований скважин. Излучение и запись разнесены во времени в повторяющихся циклах в соответствии с заданным алгоритмом работы аппаратуры.

Для сравнения графики сигналов приведены для одинаковых глубин, в одних масштабах времени и амплитуды. Уже по внешнему виду сигналов САЭ видно, что активность и энергия эмиссии после воздействия возросли и проявляются в виде повторяющихся импульсов, однако по-разному на разных глубинах. Эти фрагменты записи сигналов выделены из общей записи сигналов продолжительностью 15–60 с. Основные параметры сигналов были проанализированы в соответствии с методикой по ГОСТ 27655-88 [15], а также методом Гильберта–Хуанга.

Энергия акустической эмиссии, выделяемая в исследуемом интервале записи, определялась экс-

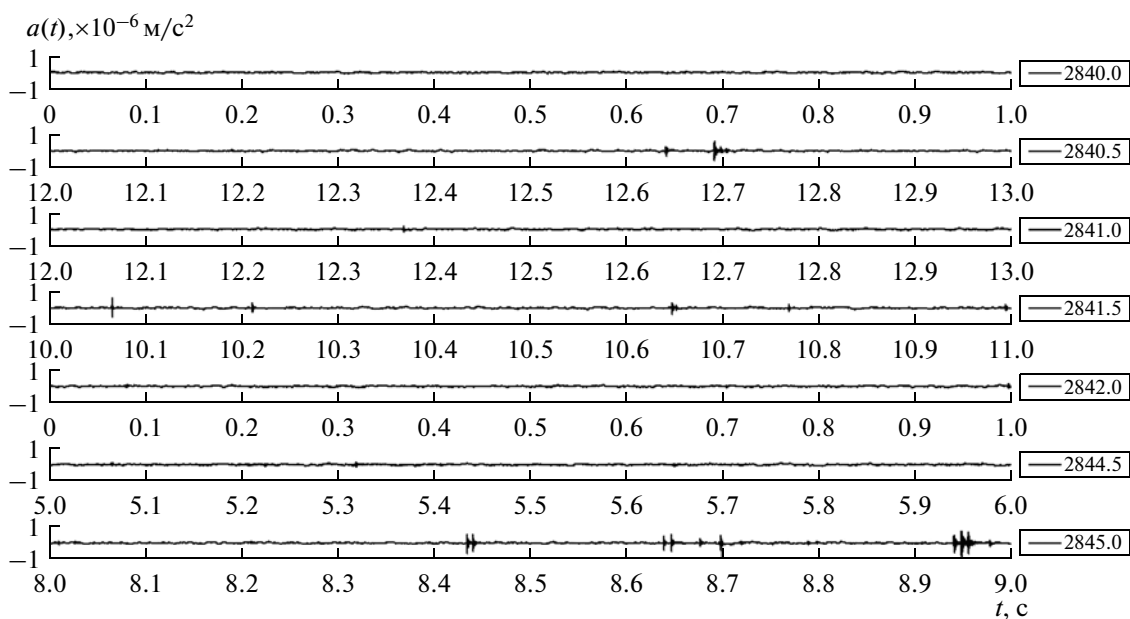


Рис. 1. Тевлинско-Рускинское месторождение, пласт БС10 (2–3) нефтенасыщенный пласт, фрагменты фоновой записи САЭ.

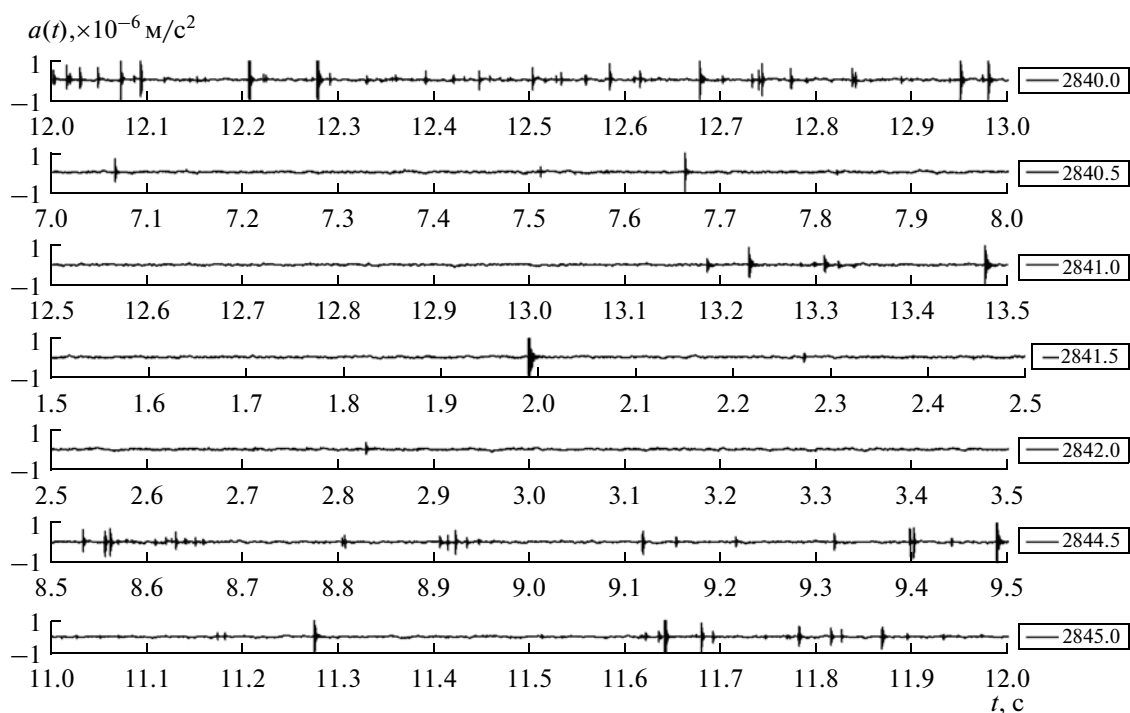


Рис. 2. Тевлинско-Рускинское месторождение, пласт БС10 (2–3) нефтенасыщенный пласт, фрагменты записи САЭ после акустического воздействия.

пресс-методом вычисления спектральной плотности энергии во всем регистрируемом диапазоне частот и регистрировалась специальной геофизической станцией. Среднее увеличение сигнала САЭ составляло 12–42% прироста относительно фона,

в то время как события акустической эмиссии в виде единичных действий источников эмиссии происходили случайным образом, но имели при этом характерные параметры импульсов сигнала АЭ конечной длительности определенной формы

с определенным максимальным значением энергии и частоты заполнения. Было отмечено наличие доминирующих частот в составе АЭ.

Сопоставление параметров эмиссионных сигналов с геологическими характеристиками месторождений позволило установить зависимость их спектрально энергетической характеристики и доминирующих частот с поровым или трещиноватым видом фильтрационных свойств коллектора. Так, в разрезе Тевлинско-Рускинского месторождения выявлены несколько продуктивных пластов: БС10 (2 + 3), БС11 (1 + 2), залегающих на глубинах 2500–2900 м. Пласты сложены мелкозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Коллекторами являются песчаники и алевролиты, неколекторами – аргиллиты и глины. Фильтрационно-емкостные свойства этих коллекторов изменяются в широких пределах: пористость от 21.2 до 26.9%, проницаемость – от 2 до 444 мД.

По результатам геолого-геофизической информации промысловых испытаний на приток нефти из этих пластов и сопоставления с данными КСАЭ установлено, что их продуктивность определяется поровыми и трещиноватыми типами коллекторов, которые различным образом выделяются по доминирующим частотам и динамике их энергии после акустического воздействия. Коллекторы с проницаемостью 2–12 мД обладают доминантными частотами (6–9 кГц) и имеют прирост 30–40% энергии САЭ относительно фоновой, при испытаниях на приток в двух скважинах они обеспечили дебит 34–40 тонн в сутки нефтью с обводненностью, не превышающей 2%.

Аналогичные испытания коллектора с проницаемостью 221–444 мД показали дебит 40 тонн в сутки, при этом параметры акустической эмиссии составили: доминирующая частота (10–12 кГц), прирост энергии 90–180% относительно фоновой. Для этих коллекторов характерно проявление второго диапазона доминантных частот в области (2–4 кГц) с динамикой в 2–3 раза меньшей, чем предыдущая частота.

Изменение активности эмиссии по разрезу пласта носит резко неоднородный характер, что свидетельствует о сильной неоднородности пласта-коллектора в отношении его фильтрационно-емкостных свойств рис. 3. В колонке “литология” показаны продуктивные пласты перспективные на содержание нефти по результатам геофизических исследований не обсаженной скважины. В колонке “глубина” отмечена зона перфорации выполненная с учетом информации САЭ. Графики спонтанной поляризации и градиент зонда SP и Ps (N6.0M0.5) отображают наличие пласта коллектора в интервале 2840–2848 м с разбивкой на три подинтервала. График “Амплитуда*” показывает изменение относительной амплитуды сигнала САЭ после акустического воздействия относи-

тельно фоновой амплитуды. График “Интенсивность*” показывает изменение интенсивности импульсных сигналов эмиссии после акустического воздействия также относительно фона.

Большая неоднородность пласта отражается в этих графиках и имеет тенденцию к возрастанию эмиссионной активности в двух верхних интервалах, которые после перфорации дали приток нефти. В то же время, нижний интервал показал слабую и даже отрицательную динамику эмиссии, что свидетельствует об отсутствии нефти. Этот интервал не был включен в состав перфорированной части пласта.

Наиболее отчетливо прослеживается связь энергии САЭ с расчетным коэффициентом проницаемости $K_{пр}$ (мД) (рис. 4), полученным по результатам ГИС в открытом стволе скважины. Энергия САЭ определялась, как и в предыдущем случае, в отношении к фоновой энергии, измеренной до акустического воздействия. Энергия после акустического воздействия определялась как суммарная энергия высокочастотной составляющей сигнала САЭ, измеренной с шагом 0.5 м по глубине скважины. Относительная энергия высокочастотной составляющей САЭ:

$$E^* = 20 \lg \left(\sum Eat(i) / E(fon) \right), \quad (дБ)$$

где $\sum Eat(i)$ – суммарная энергия сигнала САЭ, определенная по спектральной плотности энергии высокочастотной части спектра, полученная после нескольких ($i = 2-4$) сеансов акустического воздействия; $\sum E(fon)$ – фоновая энергия сигнала в той же части спектра.

В верхних интервалах пласта с проницаемостью 220 и 444 мД происходит существенное увеличение энергии САЭ после воздействия, что согласуется с данными на графиках рис. 4. В нижнем интервале пласта изменение энергии имеет более сложный характер и включает как увеличение энергии, так и ее уменьшение после воздействия. В непроницаемых интервалах между пластами коллекторами изменение энергии носит отрицательный характер. Последнее, вероятно, связано со снятием механических напряжений в непроницаемой и ненасыщенной горной породе при акустическом воздействии.

Таким образом, сделанные в работе [11] выводы о перспективе развития методов поисков и разведки нефти на основе использования естественной и наведенной САЭ получили убедительное подтверждение. Влияние на залежь волновым или акустическим воздействием, описанное в этой работе и во многих других, связывают с увеличением добычи нефти за счет увеличения фазовой проницаемости коллектора. Однако здесь со ссылкой на [16] впервые отмечаются два фактора воздействия на залежь, это непосредственное действие искусственных вибраций на среду и опо-

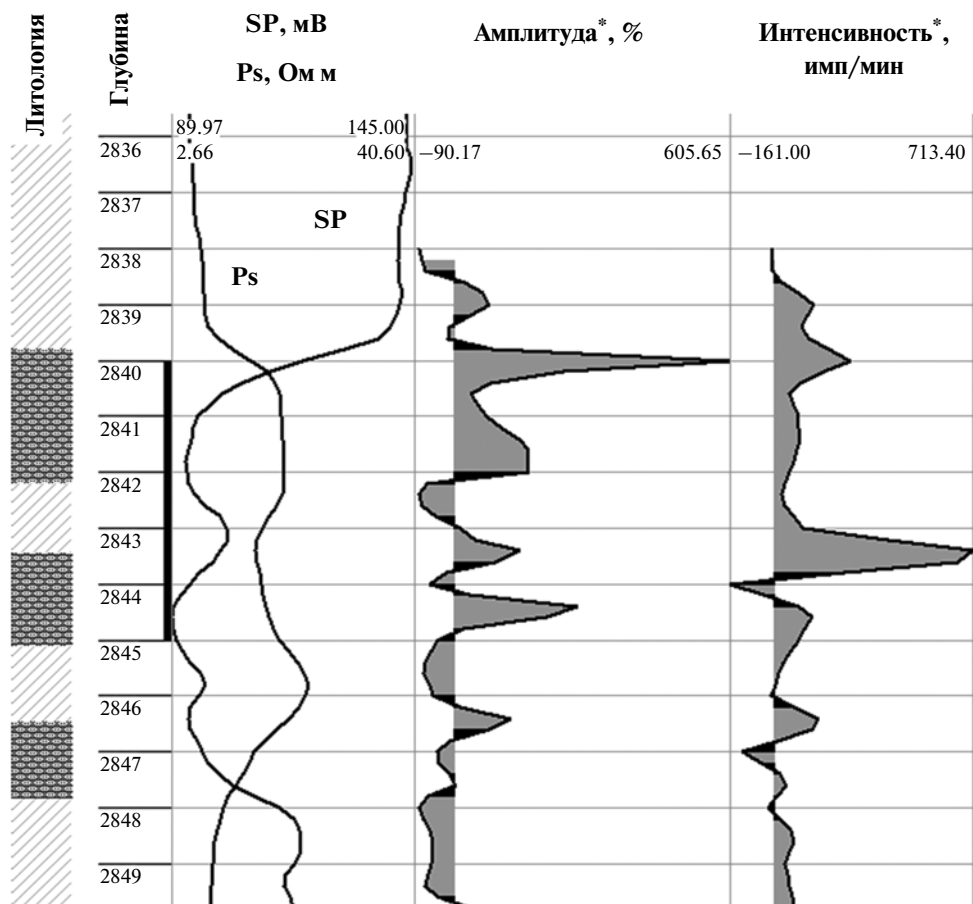


Рис. 3. Диаграммы стандартных геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсмоакустической эмиссии.

средованное действие самой сейсмоакустической эмиссией, которая была вызвана этими вибрациями. При этом отмечается, что на фоне равномерного вибрационного воздействия происходит второй процесс локального кратковременного облучения

небольшого объема среды мощным акустическим полем. Это поле является более эффективным фактором, влияющим на проницаемость нефтенасыщенной среды, чем равное ему по мощности поле периодических колебаний, возбуждаемых вибратором.

Что касается параметров сигналов САЭ в более широком диапазоне частот и их динамики, то исследования показали хорошее совпадение с результатами исследований в скважинах при вибровоздействии 50-тонным вибратором. Так, по оценкам академика А.С. Алексеева, мощность волнового поля в продуктивном пласте на глубине 2–3 км составляет порядка $(10^{-7}–10^{-6} \text{ Вт/м}^2)$ при работе этого вибратора на поверхности месторождения на частоте 7–11 Гц [17]. В его работах приводятся результаты измерения спектральной плотности сейсмоакустической эмиссии в скважине до и после вибрационной обработки горных пород с дневной поверхности. Точки измерения находились на глубине 1531 и 1000 м в пористых песчаниках пласта “П” Мортимья-Тетеревского месторождения. Частота вибрации составляла 7.3 Гц, амплитуда колебаний нефтепродуктивного пласта оценивалась величиной $3.8 \times 10^{-9} \text{ м}$ в диапазоне 2–26 Гц. Поток энергии мо-

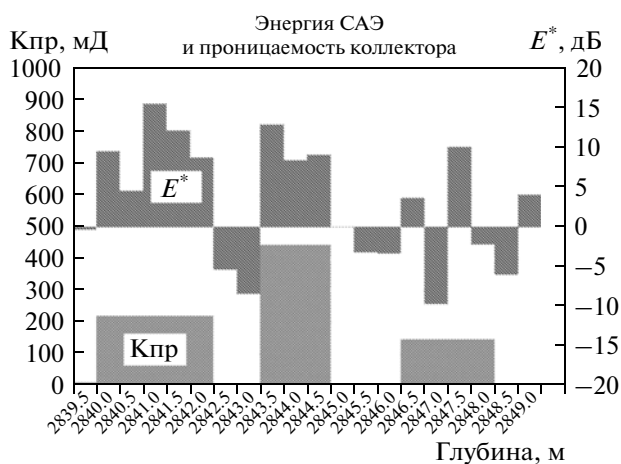


Рис. 4. Соотношение энергии, вызванной САЭ с проницаемостью коллектора.

нохроматической сейсмической волны, проходящей через единичную площадь, составляет величину, показанную выше; при этом отмечается возникновение автоколебательных процессов в нефтепродуктивном пласте на частотах, отличных от частоты монохроматического воздействия, длительный характер звучания пласта и возникновение резонансов однородной по акустической жесткости осадочной толщи горных пород. Далее отмечается, что собственные резонансные частоты пласта квантованы и составляют пиковые значения в указанном диапазоне частот, который авторы связывают с концепцией фрагментированности блочной среды и доминантными частотами пикового усиления сейсмической эмиссии горных пород [18–20].

Приведенные здесь исследования “сейсмической люминесценции” нефтепродуктивного пласта показали наличие двух составляющих процесса излучения упругой энергии продуктивным пластом, состоящие из его становления и релаксации. Параметры этого процесса заключаются в усилении излучения на низких доминантных частотах, достигающего 20 дБ относительно фонового значения и развивающегося во времени на протяжении от десятков минут до двух суток. Особо отмечается влияние вибросейсмического воздействия малой интенсивности на высокочастотную сейсмоакустическую эмиссию в диапазоне частот 10.5–14.5 кГц, которая наблюдалась в течение двух суток после вибросейсмического воздействия и превышала фоновое значение в два раза. Отмечен также меньший пик на частоте 2.5 кГц.

В результате наших исследований в технологическом цикле регистрация–воздействие–регистрация были получены следующие параметры сигналов САЭ: измеренная амплитуда ускорения в скважине на глубине 2500–2900 м составляла $Am = (3.3–3.59) \times 10^{-3}$ м/с²; амплитуда скорости, вычисленная на частоте максимального ускорения в диапазоне 8.52–11.2 кГц $Vm = 5.06 \times 10^{-9}–5.48 \times 10^{-8}$ м/с. При средней плотности горной породы 2200 кг/м³ и скорости звука 3000 м/с можно оценить удельную плотность энергии САЭ величиной $W = 2.8 \times 10^{-14}–3.3 \times 10^{-12}$ Дж/м³ и плотность потока энергии $I = 7.9 \times 10^{-11}–5.4 \times 10^{-8}$ Вт/м².

Частота максимального ускорения, приведенная в этих расчетах, определялась по спектральному анализу сигналов САЭ, которые имеют характер высокочастотных затухающих импульсов (рис. 1 и 2), причем эти импульсы могут присутствовать в нефтенасыщенном пласте как в фоновом замере САЭ и появляться или усиливаться после акустического воздействия. Как правило, САЭ проявляется в виде пакета импульсов длительностью несколько секунд.

Дальнейший анализ процессов в пласте был проведен при помощи разложения сигнала САЭ на эмпирические моды методом Гильберта–Хуанга, с последующим применением к полученным компонентам разложения преобразования Гильберта. Метод позволяет реализовать адаптивный анализ нелинейных и нестационарных сигналов и получить набор эмпирических мод непосредственно из данных временной реализации сигнала, что дает возможность учесть все его локальные особенности в реальном времени [21].

На рис. 5 приведен пример разложения сигнала САЭ длительностью 2 с на эмпирические моды и определение доминирующих частот. На рис. 5 показаны только шесть основных мод, имеющих наибольший вклад в энергию исходного сигнала, всего при этом разложении получено 16 мод. Верхний график – это исходный сигнал слева и его спектр Фурье справа, ниже – график первой моды и ее спектр и так далее. Частота основной гармоники на первых двух графиках одна и та же – 10.4 кГц означает, что наибольший вклад в спектральную плотность энергии САЭ вносит высокочастотная составляющая. Однако последующие моды разложения показывают наличие ярко выраженных составляющих с основными частотами: 2793, 1477, 72, 48 и 16 Гц, которые совпадают с доминантными частотами, описанными в [17].

На рис. 6 и 7 приведены графики расчетной амплитуды и плотности потока энергии САЭ от частоты для исходного сигнала и его эмпирических составляющих, полученных при разложении сигнала длительностью 2 с из указанного интервала времени, и точки записи в скважине.

Плотность потока энергии эмпирической моды, исходя из результатов измеренного значения сигнала САЭ и расчетных значений его эмпирических мод, определяется как

$$I(N) = \frac{1}{2} \rho c \frac{A^2 m(N)}{\omega^2(N)} \text{ (Вт/м}^2\text{)},$$

где c – акустический импеданс горной породы, $Am(N)$ – амплитуда ускорения N -й моды эмпирического разложения САЭ, $\omega(N)$ – средняя частота N -й моды.

Несмотря на уменьшение энергии и амплитуды в низкочастотных модах, их удельная энергия увеличивается (рис. 6) и составляет величину, в точности совпадающую с данными полученными в [17], а именно, лежащую в диапазоне

$$I(N) = (10^{-7}–10^{-6} \text{ Вт/м}^2\text{)}.$$

Результаты успешного применения технологического воздействия на залежь нефти полем упругих колебаний имеют также ранние источники информации [22, 23]. В них использовались в основном скважинные источники упругой

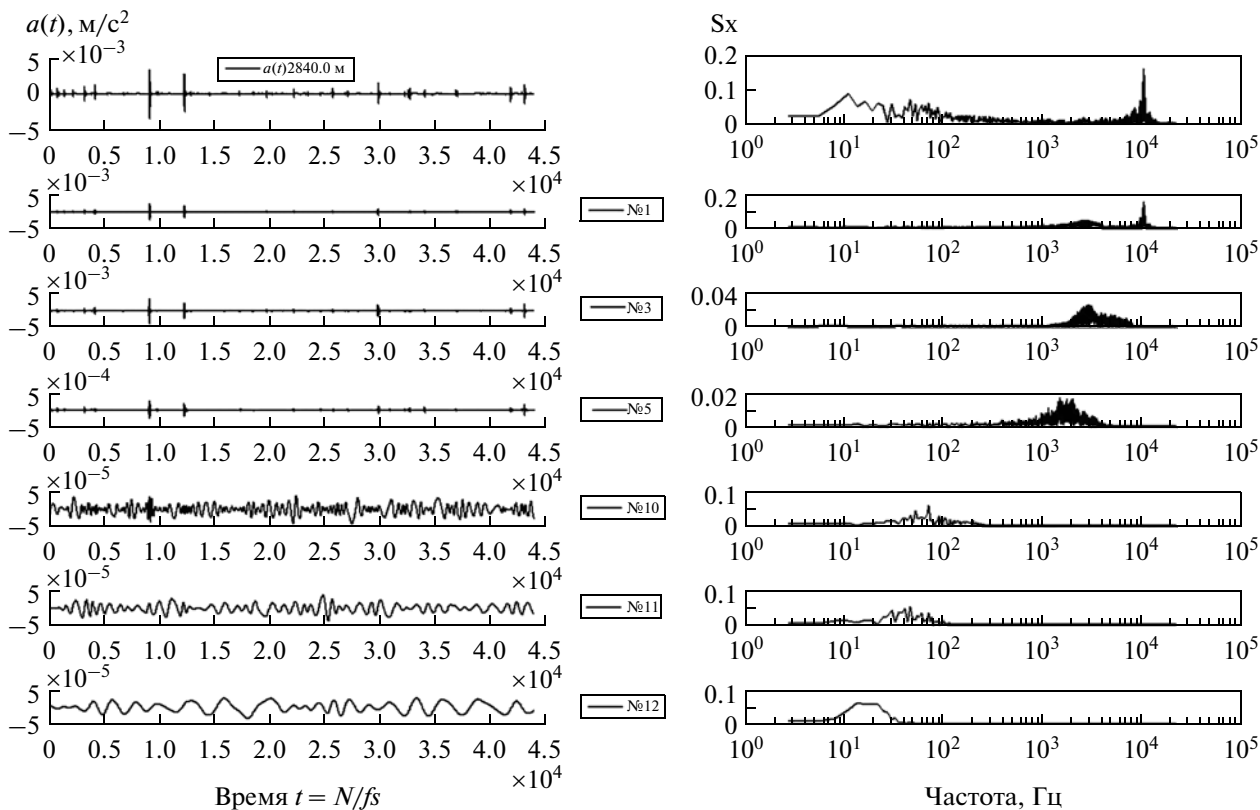


Рис. 5. Пример разложения сигнала САЭ длительностью 2 с на эмпирические моды и определение доминирующих частот.

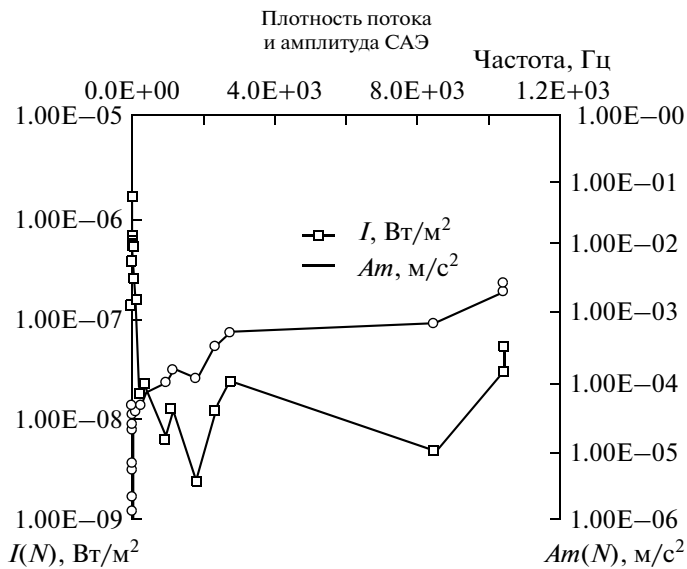


Рис. 6. Частотная зависимость плотности потока энергии и амплитуды поля САЭ.

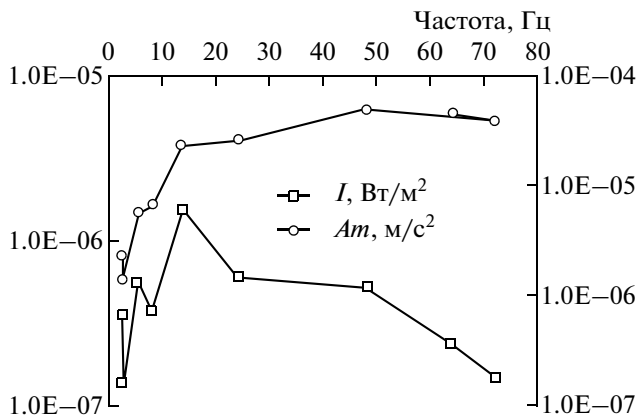


Рис. 7. Фрагмент частотной зависимости плотности потока энергии и амплитуды поля САЭ в низкочастотной области спектра.

энергии и применялась методика исследования скважин по схеме: каротаж—воздействие—каротаж. При этом впервые ставилась задача извлечения информации о свойствах геологической среды мето-

дами нелинейной геофизики, которые были основаны на активном воздействии упругими волнами на геологическую среду, и изучения изменений этих свойств в реальном времени.

ВЫВОДЫ

Таким образом, сейсмоакустическая эмиссия, вызванная силовым акустическим воздействием в скважине, значительно превышает фоновую эмиссию нефтенасыщенного пласта и способна, таким образом, служить информативным фактором его продуктивности. Причем это относится в первую очередь к высокочастотной составляющей САЭ.

Динамические нелинейные процессы в продуктивном пласте находят свое отражение в постоянно действующем излучении упругой энергии в сейсмическом и акустическом диапазоне частот, что следует из анализа фоновых записей САЭ. При этом любое внешнее упругое воздействие на залежь вызывает активизацию таких процессов становления и релаксации состояний насыщенного порового пространства, как, например, фильтрации, дегазации, фазовой проницаемости и др., при условии наличия углеводородов сложного состава и воды. Эти процессы неизбежно изменяют энергетическое состояние среды, которое отражается в изменении акустической эмиссии. Корреляция высокочастотной части САЭ с низкочастотной свидетельствует о развитии процесса в пространстве на разномасштабных уровнях. Вероятно, такая согласованность диапазонов частот САЭ отражает способность процесса охватить всю залежь углеводородов при наличии разового или периодически повторяющегося спускового механизма в виде виброволнового воздействия.

Работа выполнена по материалам, предоставленным НПФ Интенсоник при поддержке программы фундаментальных исследований по науке о Земле РАН № 12-П-5-1016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. С. 29–35.
2. Лавров А.В., Шкурятник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. 2005. Т. 51. Приложение. С. 6–18.
3. Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. О волновых формах микросейсмического шума // Технологии сейсморазведки. 2008. № 2. С. 55–57.
4. Николаев С.А., Овчинников М.Н. Генерация звука фильтрационным потоком в пористых средах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 1. С. 114–118.
5. Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // Геофизика. 2004. № 2. С. 25–30.
6. Николаевский В.Н. Сейсмовибрационный метод оживления нефтегазового обводненного пласта // Геофизические исследования. 2005. Вып. 1. С. 37–47.
7. Dangel S., Schaepman M.E. et al. Phenomenology of tremor – like signals observed over hydrocarbon reservoirs // J. Volcanology and Geothermal Res. 2003. V. 128. P. 135–158.
8. Гурфельд И.Л., Корольков А.В., Новоселов О.Н., Хрулев Е.Н. Отражение геодинамических процессов в локальной геоакустической эмиссии // Вулканология сейсмология. 2009. № 6. С. 62–73.
9. Хаврошкин О.Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 286 с.
10. Баженова Е.Д., Вилман А.Н., Есипов И.Б. Флуктуации акустического поля в гранулированной среде. Акуст. журн. 2005. Т. 51. Выпуск “Геоакустика”. С. 46–52.
11. Беляков А.С., Гамбурцев А.Г., Лавров В.С., Николаев А.В., Приваловский Н.К. Иницирующие вибровоздействия и сейсмическая эмиссия горных пород // ДАН. Физика земли. 1996. № 2. С. 68–74.
12. Беляков А.С., Кузнецов В.В., Лавров В.С., Севальнев А.В. Результаты измерений сейсмоакустического фона во внутренних точках геологической среды // ДАН СССР. Геофизика. 1987. Т. 295. № 3. С. 567–568.
13. Дрягин В.В. Способ определения характера насыщенности коллектора. Патент РФ № 2187636 от 21.02.2001.
14. Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е. Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии. Акуст. журн. 2005. Т. 51. Выпуск “Геоакустика”. С. 66–73.
15. ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1988.
16. Киссин И.Г., Склянин Ю.И. О природе сейсмических эффектов на нефтяных месторождениях // Гидрогеодинамические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1984. С. 66–75.
17. 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. 2001. № 6. С. 3–12.
18. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
19. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. и др. Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натуральных наблюдений // ФТПРПИ. № 5. 1996.
20. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.
21. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. Lond. A. 1998. Т. 454. С. 903–995.
22. Сургучев М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Гидродинамическое, акустическое и тепловое циклические воздействия на нефтяные пласты. М.: Недра, 1975. 184 с.
23. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. 286 с.