

Гармонические и нелинейные компоненты сейсмических вибрационных волновых полей в пористых, трещиноватых, проницаемых, флюидонасыщенных средах

Жуков А.П., Шулакова В.Е., ООО "Геофизические Системы Данных"
Логинов К.И., Институт Проблем Нефти и Газа РАН

Шнеерсон М.Б., проф. Московского государственного геолого-разведочного университета, г. Москва

Введение

Проблема нелинейности сейсмических волновых полей в геологических средах как один из фундаментальных вопросов науки о Земле привлекает в последние годы все больший интерес и в прикладном отношении - при решении задач прогнозирования, разведки и мониторинга залежей полезных ископаемых, прежде всего углеводородного сырья. Линейно - упругое приближение, в качестве концептуальной основы, уже давно не удовлетворяет потребностям развития новых методов изучения земных недр сейсмическим способом, и, главное, не может адекватно объяснить достаточно большой круг эффектов, зарегистрированных экспериментальным путем.

Тем не менее, вопрос о необходимости и корректности использования нелинейных эффектов в сейсморазведке - сейсмике малых колебаний - однозначно сегодня не решен, несмотря на обилие теоретических и экспериментальных лабораторных исследований. Одним из факторов, сдерживающих решение этого вопроса, остается отсутствие специальных, целенаправленных полевых исследований именно в области методик, технических средств, используемых разведочной сейсморазведкой.

Альтернативным путем развития разведочной сейсмоакустики является создание методов, базирующихся на принципиально новых физических моделях реальных сред, учитывающих энергетическую активность и сейсмическую нелинейность коллекторов нефти и газа, что резко отличает их от непроницаемых вмещающих горных пород. Одним из перспективнейших направлений, несомненно, может стать специальное применение вибрационных источников.

Вибросейсморазведка возникла, как альтернатива импульсной, взрывной сейсморазведке. При этом в первую очередь ставились задачи оптимизации работ по экономическому и экологическому признакам. Однако, возможность зондирования геологических разрезов разнообразными и, главное, точно контролируемыми по своим параметрам вибросигналами, сама по себе открывает новые широкие возможности для изучения тонких, в том числе нелинейных свойств горных пород.

В качестве научно-методической основы применения виброисточников для изучения нелинейных эффектов необходимо привести результаты работ последних лет, выполненных авторами настоящей статьи [4,5,6,7], научной школой ИФЗ РАН [1,2,3,8] и др.

Выделим главные, фундаментальные проявления сейсмической нелинейности геологической среды:

- нелинейная зависимость амплитуд волн, зарегистрированных приемниками от амплитуд в источнике вибросигналов;
- возникновение в горных породах коллекторах колебаний кратных частот (гармоник) и комбинационных волн разностных и суммарных частот.

Основными геологическими объектами, ответственными за указанные феномены, являются пористые, трещиноватые, проницаемые, флюидонасыщенные горные породы - потенциальные коллекторы нефти и газа.

Однако во многих экспериментальных работах

геологический разрез рассматривается как единое тело, и не приводится привязка нелинейных явлений к обособленным геологическим телам. Целью настоящей работы было изучение нелинейных свойств вибросейсмических волновых полей для непосредственного использования в задачах прогнозирования, разведки и мониторинга месторождений углеводородного сырья.

Изучение нелинейности амплитуд отраженных волн относительно изменения амплитуд исходного вибросигнала.

Комплекс опытно-методических работ по изучению нелинейных свойств углеводородосодержащих геологических разрезов был проведен на одном из месторождений Татарстана совместно ООО "Геофизические Системы Данных" и ОАО "Татнефтегеофизика".

Полевые работы проводились на профиле длиной 6 км, пересекающем сводовую часть Гардинского поднятия (Татарстан), содержащую два нефтеносных этажа: нижний - в карбонатах кыновского горизонта верхнего девона и верхний - в терригенных отложениях тульской горизонта нижнего карбона. Нефтеносность подтверждена разведочным и эксплуатационным бурением.

На профиле была осуществлена расстановка сейсмоприемников (120 групп по $12 = 3 \times 4$ приборов) с расстоянием между пикетами 50 м (пикеты пронумерованы с 281-го по 400-й), и шагом между приборами в группе 2 м. Расстановка перекрыла весь профиль и в ходе всех экспериментов не перемещалась.

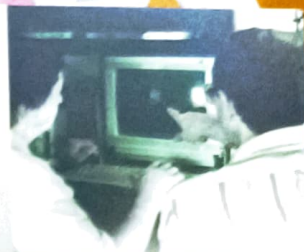
По данным ОАО "Татнефтегеофизика" 1997 года водонепроницаемый контакт тульской залежи проецируется на данный профиль в районы пикетов 309 и 371.

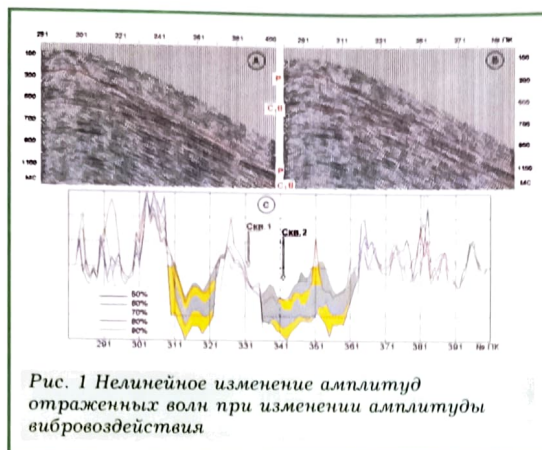
В ходе наблюдений одним вибратором возбуждался ЛЧМ свип-сигнал 14 - 125 Гц длительностью 6 с при разной нагрузке на плиту вибратора. Номиналы нагрузки составляли 50, 60, 70, 80 и 90 % от максимальной. При каждом режиме осуществлялось 8-ми кратное накопление. Всей расстановкой сейсмоприемников (120 каналов) записывались виброграммы длительностью 10 с.

Ниже приведен пример результатов наблюдений на одной из точек профиля, при положении вибраторов - на ПК 293 - вне пределов контура залежи.

Обработка заключалась в коррелировании всех 5-ти полученных виброграмм с одним и тем же синтетическим свипом 14 - 125 Гц, выделении отраженных волн на коррелограммах и сопоставлении динамических параметров сейсмограмм, полученных при разной нагрузке на плиту вибратора (разных амплитудах исходного сигнала) при прочих равных условиях.

На рис.1 приведены сейсмограммы отраженных волн для двух разных режимов вибродействия: I-A - при номинале нагрузки 50% от максимальной и I-B - 90 %. На сейсмограммах выделены оси синфазности, соответствующие первому иступлению волн, отраженных от плотной, непроницаемой толщи сульфатно-карбонатных отложений Пермской системы и от содержащего нефть терригенного тульского горизонта нижнего карбона. Визуальный анализ сейсмограмм говорит о кинематической





идентичности двух записей, и ничего не выявляет в их сравнительной динамике.

На нижнем изображении рис.1 приведены изменения значения отношений средних амплитуд волнового пакета тульского отражения (64 мс) к тому же параметру для перми вдоль профиля для всех 5-ти режимов работы вибраторов. На участках профиля с ПК 281-309, 325-335 и 363-400 эти отношения в пределах точности эксперимента совпадают. В двух оставшихся участках - нет. Причем на некоторых пикетах наблюдается монотонное изменение отношения. Участок 309 - 363, в целом совпадает с проекцией на профиль тульской залежи, причем возле 332 ПК, в пределах залежи расположена непродуктивная скважина, а возле 342 - скважина, давшая промышленный приток нефти. Совпадение значений приведенных параметров свидетельствует о выполнении принципов "линейно-упругого" приближения теории распространения сейсмических волн, несовпадение говорит о нелинейности связи между амплитудой возбужденного в источнике сигнала и амплитудой отклика среды.

Вообще, если в двух фиксированных точках или областях среды при одном и том же увеличении амплитуды колебаний в источнике амплитуды меняются в разной пропорции, то по крайней мере, одна из областей сейсмически нелинейна. В данном случае это, очевидно, относится к тульским коллекторам.

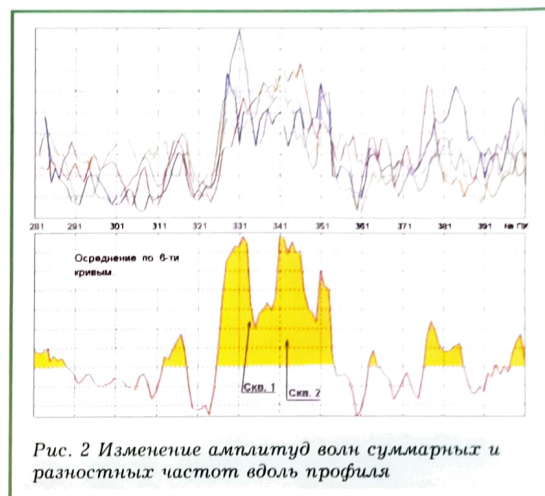
Или - в свете полученных результатов - зоны развития коллекторов УВ нелинейны по признаку нелинейности между амплитудами возбужденного и зарегистрированного сигнала.

Волны комбинационных частот от двух вибраторов, излучающих разные моночастоты.

Методика полевых работ на описанном выше профиле, в данном случае, заключалась в одновременном возбуждении двумя вибраторами разных моночастот. Одно вибросейсмическое

зондирование состояло из 9-ти физических наблюдений, при каждом из которых вибраторы находились на расстоянии друг от друга 600, 400 или 300 м, и генерировали пару моночастот 15, 60, 33 - 15 или 20 - 30 Гц. Далее приведены части результатов одного из зондирований (всего их выполнено 6 на разных участках профиля). Во всех случаях на полученных виброграммах, кроме исходной, пары моночастот ω_1 и ω_2 , выделяются колебания кратных частот (гармоники), в том числе, иногда, 3-ей кратности ($2 \times \omega_1$, $3 \times \omega_1$, $2 \times \omega_2$), иногда комбинационных частот $\omega_1 + \omega_2$ и $\omega_1 - \omega_2$, иногда и их более сложные комбинации.

На рис. 2 показаны амплитуды волн разностных и суммарных частот для трех разных физических наблюдений в зависимости от пункта



приема на профиле. Методика расчета амплитуд заключалась в следующем:

На вибротрассе, соответствующей по пункту приема каждому из пикетов профиля, выбирались первые 1000 отсчетов (2 с), эта выборка подвергалась преобразованию Фурье, рассчитывался амплитудно-частотный спектр выборки, с результирующим шагом дискретизации по частоте 0.5 Гц. В качестве амплитуды на выбранной суммарной или разностной частоте принималось значение, среднее по 5-ти ближайшим точным значениям спектра.

Полученные кривые отличались друг от друга в абсолютных значениях, иногда, более чем на порядок. Поэтому далее они нормировались на свои средние значения. Кроме того, каждое значение отнесено к соответствующим значениям исходных моночастот (среднему из двух) для каждой точки регистрации, наконец, введена программная регулировка усиления в виде

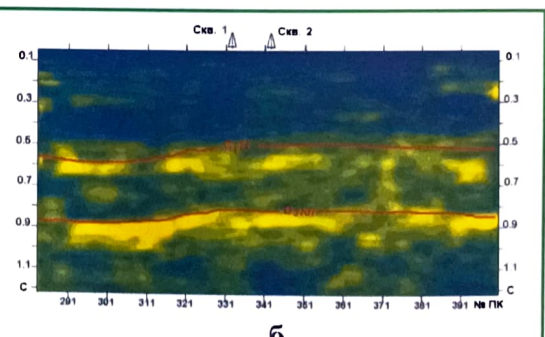
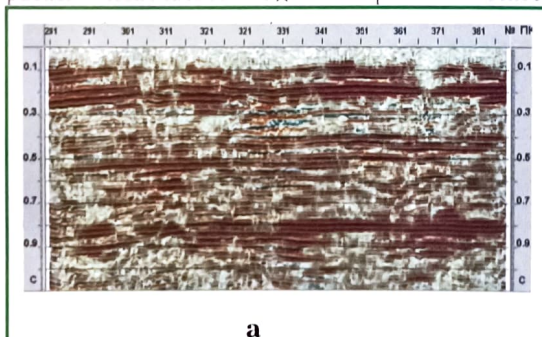


Рис. 3

а) Временной разрез, полученный при возбуждении одним вибратором ЛЧМ свип-сигнала 25-70 Гц, вторым моночастоты 13 Гц. При корреляции использован "разностный" свип 12-57 Гц.
б) Разностный индикатор коллекторских свойств, полученный с использованием комбинационных волн (разностных частот)

экспоненты, рассчитанной по двум точкам — в начале и конце профиля. Физический смысл описанных преобразований — феноменологический учет простого линейного поглощения, расхождения, рассеяния. В итоге кривые и приведены к указанному виду.

Наблюдается протяженная зона увеличения значений амплитуд комбинационных волн в районе ПК 325 - 355 — это свод структуры, содержащей залежи. В пределах этой зоны можно отметить и понижение значения в районе ПК 333-339 — участке уже упоминавшейся непродуктивной скв. 1. Природу остальных участков относительно повышения амплитуд однозначно интерпретировать сложно, т. к. в исходный временной интервал, использованный для анализа (2 с), входят физически разные (отраженные, преломленные, кратные и т. д.) волны, соответствующие по глубине всему осадочному чехлу и верхней части фундамента.

Однако, несомненен вывод: *зоны развития многокомпонентных проницаемых пород, возможных коллекторов углеводородов, служат областями генерации волн комбинационных частот, следовательно, нелинейны и по этому признаку.*

Сравнительный анализ динамических характеристик временных разрезов по волнам на обычных и комбинационных частотах.

При решении этой задачи применялась новая методика полевых вибросейсмических работ. На каждом ПВ профиля одновременно возбуждались ЛЧМ свип-сигнал 25 - 70 Гц длительностью 6 сек (один вибратор) и моночастота 13 Гц (второй вибратор).

Идея эксперимента заключалась в выделении волн с комбинационными частотами методом построения трех разных временных разрезов: первый, "исходный", используя для корреляции основной свип 25 - 70 Гц, второй, "разностный" — с синтетическим свипом 12 - 57 Гц и третий, "суммарный" с синтетическим свипом 38 - 83 Гц. Теоретически флюидонасыщенные, сложнопостроенные среды, обладающие большей сейсмической нелинейностью, должны выделяться в сравнении с основным полем на нелинейных разностных и суммарных частотах.

Все прочие параметры и приемы обработки, кроме использования для корреляции разных свипов, во всех случаях остаются неизменными.

На рис. 3а, в качестве примера, приведен временной разрез суммарных частот. Со структурной точки зрения он отличается от исходного (25 - 70 Гц) только частотным составом и временной разреженностью. Сама возможность построения временных разрезов при использовании для корреляции свип-сигналов разностных и суммарных частот подтверждает закономерное возникновение в реальной геологической среде нелинейных комбинационных волн.

Сравнение динамики исходного разреза и разреза суммарных частот проводилось по принципу их количественного сопоставления в частотной области после приведения средних амплитуд на разрезах к одному уровню. Опускаем, являющийся "know how", конкретный алгоритм сопоставления. В нулевом приближении — это спектральная разность между вторым и первым разрезами.

Изображение для соответствующего "индикатора коллекторских свойств", приведено на рис. 3б. Здесь, тоже выделяются коллектора под кровлей тульского горизонта. Основная "залежь" прорисовывается в центральной, сводовой, части структуры, между ПК 315 и 355, причем опять видна перемишка в районе скв. 1. В левой и правой части профиля, под структурным понижением кровли тульского горизонта проявляется отдельные, обособленные, зоны улучшения коллекторских свойств. Выделяется и нижний, девонский,

нефтеносный этаж.

Кроме этого, на рис. 3б прослеживаются субвертикальные зоны повышенной коллекторских свойств, одна из них ограничивает залежь слева и совпадает с разломом, известным по другим геолого-геофизическим данным. Логично предположить, что эти субвертикальные аномалии соответствуют трещинным зонам, опережающим тектонические нарушения.

Очевидным фактом является возможность использования нелинейных волн кратных, суммарных и разностных частот для прогнозирования коллекторских свойств геологических разрезов.

Заключение

В результате проведения полевых работ по использованию гармонических и нелинейных компонент вибрационных волновых полей для определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород и обработки полученных материалов необходимо отметить следующие основные результаты.

Показано, что вибросейсмические поля проявляют существенно нелинейные свойства, при этом нелинейные эффекты связаны, прежде всего, с многокомпонентными, пористыми, проницаемыми, флюидонасыщенными горными породами.

Материалы полевых наблюдений получены с помощью методик и технических средств, традиционно применяемых в разведочной сейсморазведке.

В данной постановке задачи это один из первых подобных результатов в мировой практике.

Нелинейность сейсмических характеристик пород — коллекторов проявляется, прежде всего, в таких фундаментальных свойствах, как:

- возникновение кратных гармоник (причем этот эффект возникает и в результате нелинейного взаимодействия плиты вибратора с грунтом, и в результате взаимодействия волн с погруженными слоями);
- возникновение волн комбинационных частот (суммарных и разностных);
- отсутствие линейной связи между амплитудой волн, прошедших через среду и амплитудой сигнала, возбуждаемого источником.

Использование перечисленных закономерностей позволяет выделять в разрезе разные по глубине залегания и структуре объекты, потенциально содержащие углеводороды, и, в перспективе, проводить мониторинг залежи в процессе эксплуатации.

Литература

1. Алешин А.С., Кузнецов В.В. // Исследование физико-механических свойств рыхлого грунта под плитой вибратора // В сб. "Проблемы нелинейной сейсмики" // М., "Наука", 1987 г., с 267-273.
2. Баранов В.А. Гриневский А.А., Киссин И.Г., Николаев А.В. // О некоторых эффектах вибрационного воздействия на водонасыщенную среду // ДАН СССР, т. 294, №1, 1987 г.
3. Береснев И.А., Николаев А.В., Соловьев В.С. // Экспериментальные исследования нелинейных сейсмических явлений // В сб. "Нелинейная сейсмология" // Межд. симпозиум, Суздаль, 1986 г.
4. Способ вибрационной сейсморазведки источник сейсмических колебаний для его осуществления. // РФ, Патент на изобретение № 2181492 // А.П.Жуков, М.Б.Шнеерсон, В.Н.Платонов и др.
5. А.П.Жуков, М.Б.Шнеерсон // Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки // М., "Недра", 1998 г., 100 стр. с иллюстр.
6. Логинов К.И., Верещагина Т.Н., Логинов И.В. // Нелинейные акустические свойства пористых проницаемых флюидонасыщенных сред // В сб. "Физические основы сейсмического метода", М., "Наука", 1991 г., с 134-143.
7. Логинов К.И., Козлов Е.А. Верещагина Т.Н. // Нелинейная сейсмика и акустика — шаг в будущее нефте- и газопромысловой геофизики // Тезисы Международной Геофизической Конференции SEG — EAGE, М., 1993 г., стр 40.
8. Николаев А.В. // Проблемы нелинейной сейсмики // В. сб. "Проблемы нелинейной сейсмики" // М., "Наука", 1987 г., 1887 г.



ИННОВАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ