



Н. А. Караев
Ю. П. Лукашин
Г. Н. Караев
О. М. Прокатор

ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА", САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА", САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА", САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА", САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРОВО-ТРЕЩИННЫХ ОБЪЕКТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ТЕСТИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ*

АННОТАЦИЯ. Фрагментарные физические модели с управляемыми параметрами трещиноватости и матричной пористостью имитируют объёмные порово-трещинные геологические среды с гидравлически связанным пустотным пространством. Впервые созданная "большая" составная физическая модель с включением фрагментарных моделей открывает перед моделированием перспективы в решении научно-исследовательских и прикладных методологических задач при тестировании и оптимизации современных и вновь создаваемых сейсмических технологий, применяемых при поисках коллекторов.

Изучение порово-трещинных сред относится к числу приоритетных направлений современной сейсморазведки в решении важнейшей задачи поисков и разведки залежей углеводородов в плотных низкопористых карбонатных породах. В этой связи последние десятилетия характеризуются резким усилением интереса к обоснованию и разработке новых технологий сейсмических наблюдений при определении параметров микротрещиноватости геологической среды в задачах изучения нефтегазовых коллекторов в карбонатных породах. Интерес исследователей вызван необходимостью разработки нестандартных способов измерения, а также методологии обработки и интерпретации кинематических и динамических характеристик волнового поля, формируемого в трещиноватых средах.

Не отрицая положительного значения сейсморазведки в решении проблемы поиска коллекторов, следует отметить, что нередко имеет место многозначная геологическая интерпретация наблюдаемых на сейсмических разрезах динамических аномалий, отождествляемых с целевыми объектами. С этим связаны возникшие противоречия о роли сейсморазведки при решении поисковых задач, в т. ч. и в районах Восточной Сибири. Так, в одних работах традиционный метод продольных отражённых волн авторами отнесён к числу бесперспективных при поисках и диагностике коллекторов [6, 8]. В других - перспективы поисков коллекторов связывают с многоволновой сейсморазведкой [7, 10], возможность практической реализации которой многими ста-

вится под сомнение. В последние годы в качестве альтернативы для обнаружения и диагностики коллекторов реализуются технологии, построенные на извлечении полезной информации из рассеянной компоненты волнового поля. Введение в рассмотрение рассеянных волн при поисках коллекторов привело к обострению противоречий как в вопросах геологической интерпретации сейсмических данных, так и в оценке возможностей применяемых технологий в "разбраковке" волновых аномалий рассеянных волн при идентификации и прогнозировании трещинных коллекторов. В одних случаях утверждается возможность обнаружения целевых рассеянных волн на стадии обработки данных традиционных современных (3D) сейсмических наблюдений методом Common Scattering Point [9], в других - к перспективным направлениям отнесена специальная технология полевых наблюдений и обработки данных - сейсмический локализатор бокового обзора (СЛБО) [8].

Существующая многозначность интерпретации сейсмических данных и при этом возникшие противоречия в оценке разведочных возможностей различных направлений поисков и диагностики коллекторов стимулировали проведение исследований по созданию системы тестирования применяемых технологий методами ультразвукового физического моделирования. С этой целью в развитие известных способов физического моделирования ВИРГом, а в последующем ФГУ НПП "Геологоразведка", при поддержке гранта РФФИ для создания системы тестирования современных многоволновых сейсмических технологий, впервые разработана "большая" твёрдотельная составная физическая модель [3]. В составную модель включены фрагментарные мо-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-00439.

дели, имитирующие гидравлически связанное пустотное пространство с произвольно меняемыми параметрами трещиноватости и матричной пористости, наиболее приближенные к моделям реальных типовых объектов залежи. В работе рассмотрены первые результаты опробования системы ультразвукового моделирования при тестировании многоволновых сейсмических наблюдений на примере изучения слабоконтрастных фрагментарных порово-трещинных объектов с параметрами, адекватными сейсмическим моделям Юрубченко-Токманской зоны (ЮТЗ) Восточной Сибири.

СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ ОБЪЁМНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Фрагментарные модели. На основе систематизации многочисленных экспериментальных данных к популярным сейсмическим моделям трещиноватой породы отнесены модели с эллипсоидными монетообразными включениями, имитирующими трещины, к наиболее реалистичным - модели с шероховатыми стенками, у которых сопротивление сжатию трещин моделируется упругими контактами противоположных стенок через микровыступы на этих стенках [5]. Принципиальное отличие этого типа моделей, как отмечает автор, от модели с эллипсоидными трещинами состоит в том, что в шероховатых трещинах заложено уменьшение площади участков проскальзывания волны по мере закрытия трещин под воздействием реальных напряжений в среде. В рамках предложенного класса моделей системы трещин могут иметь упорядоченную либо хаотическую структуру организации при наличии или отсутствии гидравлической связи друг с другом и с порами.

В развитие известных способов пластинчатого физического моделирования [1] впервые созданы физические модели с наперёд заданными параметрами монетообразных трещин и системы шероховатых трещин с гидравлической связью между трещинами и порами при различных режимах газо- и флюидозаполнения межпорового и трещинного пространств [4].

Разработан набор фрагментарных физических моделей с плоскими и шероховатыми стенками вертикальных трещин с раскрытостью трещин и размером изометричных пор, соответствующим и реальным объектам:

- порово-трещинные модели с вертикальной шероховатой трещиноватостью при фиксированных значениях раскрытости трещин 0,01 - 0,1 мм и размерах пор в пределах 0,2 - 1,0 мм;
- порово-трещинные модели с вертикальными плоскими монетообразными микротрещинами с заданными параметрами (размер, форма) и раскрытостью трещин 0,01 - 0,05 мм и связанной матричной пористостью.

Размеры фрагментарных моделей 125 × 60 × 60 мм, геометрическое подобие реальной среде - 1 : 4000.

Разработанный набор физических моделей при широкой вариации параметров наиболее приближен к эффективным сейсмическим моделям реальных поро-

во-трещинных объектов. Это явилось основанием для использования фрагментарных моделей как на этапе изучения волновых признаков диагностики коллекторов, так и при тестировании сейсмических технологий путём включения их в виде модулей в составную базовую модель.

Составная трёхслойная модель размером 120 × 120 × 30 см, верхний и нижний слой которой собраны из однородных блоков капролона ($V_P = 2,5$ км/с, $V_S = 1,1$ км/с). С учётом коэффициента подобия (1 : 4000) площадь модели эквивалентна площади реальных наблюдений размером 4,5 × 4,5 км. Для ослабления “боковых” волн эффективная площадь верхнего слоя составной модели увеличена до 160 × 160 см. Во втором слое толщиной 6 см на глубине 18 см (рис. 1) в виде отдельных модулей “встроены” пять различных сменных блоков размером 12,5 × 12,5 × 6,0 см с сохранением параметров фрагментарных моделей трещинных и порово-трещинных маслонаполненных систем с гидравлически связанной пористостью. Промежутки между сменными блоками заполнены однородными капролоновыми блоками, имитирующими “латеральное замещение” коллектора. Различия параметров пористости и трещиноватости в сменных блоках, одновременно присутствующих в состав-

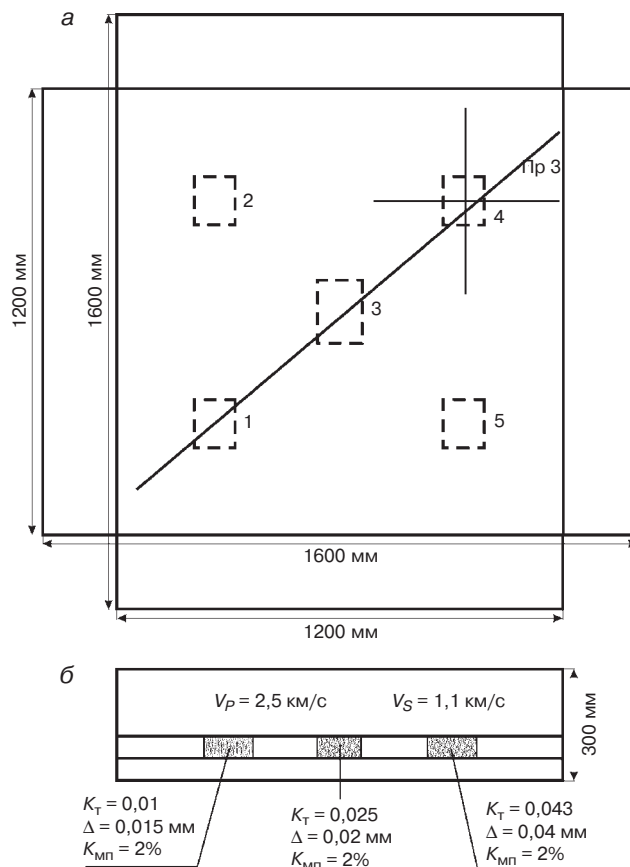


Рис. 1. Схема расположения проекций фрагментарных трещинных и порово-трещинных маслонаполненных моделей с гидравлически связанной пористостью на поверхности составной базовой модели (а) и сечение модели по линии профиля 3 (б)

ной модели, позволяют имитировать постановку и решение задачи сравнительной оценки параметров трещиноватости.

Твёрдотельные объёмные физические модели такого размера для ультразвукового моделирования до сих пор не строились. Конструкция разборной составной модели обеспечивает имитацию среды с возможностью включения сменных трещинных и порово-трещинных объектов с заданными параметрами трещин и пор при различных режимах сжатия и флюидонасыщения. С другой стороны, размеры составной модели обеспечивают возможность тестирования современных сейсмических технологий, в том числе возможность имитации полноценной 3D-сейсморазведки с целью сравнения и оценки информативности применяемых технологий как при поисках коллекторов, так и при диагностике их параметров.

СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Физическое моделирование проводится с помощью модернизированной компьютеризированной установки ультразвукового моделирования. Функциональные возможности физического моделирования в отличие от известных систем расширены за счёт реализации многоканальной системы регистрации и введения канала возбуждения высокочастотных вибрационных сигналов с преобразованием виброграмм в импульсную форму. Установка обеспечивает возможность реализации многокомпонентных и многоточечных наблюдений на моделях при различных сочетаниях параметров поляризации приёмо-излучающей системы: F_z-U_z , F_z-U_x , F_z-U_y , F_x-U_x , F_y-U_y .

Следуя работе [1], наблюдения на фрагментарных моделях проводились с помощью конической системы, при которой источник располагался в вершине конуса, а пункты приёма с интервалом через 5° на противоположной грани моделей вдоль образующей конуса (рис. 2). Путём применения конической системы наблюдений исследовались угловые изменения индикатрисы скорости и декремент поглощения продольных и поперечных волн при просвечивании исследуемых блоков моделей.

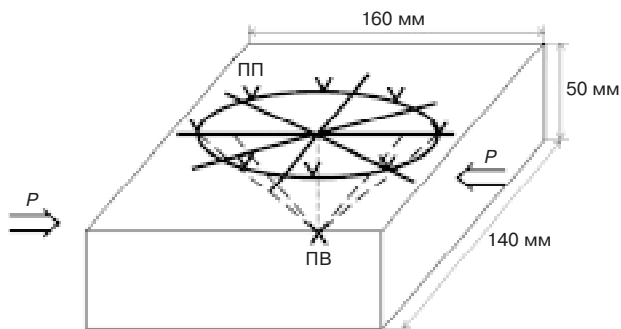


Рис. 2. Система конических наблюдений на фрагментарной модели

На поверхности составной модели реализованы многократные многоволновые 2D- и упрощённый вариант 3D-систем наблюдений при различных сочетаниях пар источник-приёмник.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Фрагментарные модели. Независимо от параметров трещин и структуры трещиноватости наблюдаемые параметры волнового поля исследуемых фрагментарных трещинных и порово-трещинных моделей адекватны условиям трансверсально-изотропной среды и характеризуются следующими основными отличительными признаками [3]:

- ослаблением амплитуд проходящих P - и S -волн вследствие эффекта рассеяния упругой энергии на системе микротрещин модели;
- расщеплением поперечной волны на две ортогонально-поляризованные волны - “быструю” SH и “медленную” SV ;
- азимутальной анизотропией скорости продольной и поперечной волн, т. е. максимальным значением скорости P - и SH -волн в направлении трещиноватости и минимальным вдоль оси симметрии, при этом показано, что декремент затухания продольной волны является более надёжным диагностическим признаком по отношению к кинематическим параметрам.

Важным результатом экспериментов, проведённых на физических моделях с монетообразной трещиноватостью, является установленное значительное влияние на характеристики волнового поля размера и формы трещин, “раскрытость” которых измеряется первыми микрометрами, а размеры существенно меньше сечения первой зоны Френеля [3, 4]. При этом основными факторами, влияющими на формирование поля рассеянных волн как при прохождении, так и отражении (рассеянии) непосредственно от удельной поверхности трещиноватых систем, являются размеры и форма микротрещин. На “круговых” сейсмограммах (рис. 3) приведён пример записи волнового поля при просвечивании контактирующих блоков, различаемых формой микротрещин с одинаковыми значениями площади трещин. Волновая контрастность между блоками чётко прослеживается в изменениях динамических характеристик P -волны. В случае трещин, характеризующихся изометрической формой, эффективные значения коэффициентов рассеяния возрастают. Так, блок, составленный из дисковых трещин, отличается более высокими рассеивающими и поглощающими характеристиками по отношению к блоку с вытянутыми в горизонтальном направлении прямоугольными вертикальными трещинами. Амплитудная контрастность продольных волн, соответствующая разным блокам, сопровождается различиями в видимых частотах регистрируемых колебаний и в анизотропии скорости продольных волн. Подобный результат был получен и при изучении особенностей рассеянных волн, отражённых от горизонтальных трещин, при этом результаты физического моделирования удов-

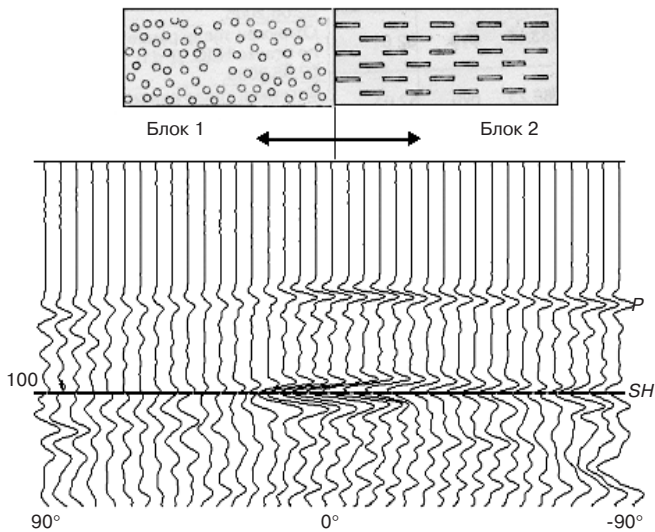


Рис. 3. Запись продольной и поперечной волн в системе Fz-Uz, полученная на дуге кругового профиля с угловым интервалом 5° при просвечивании двух контактирующих блоков, различающихся формой трещин при одинаковой плотности трещиноватости: блок 1 - с дисковыми трещинами диаметром 4 мм; блок 2 - с прямоугольными трещинами

летворительно совпали с данными математического моделирования [3].

При просвечивании фрагментарных порово-трещинных моделей с шероховатой трещиноватостью исследовалось влияние раскрытости трещин на параметры волнового поля. На рис 4, 5 приведены результаты моделирования волнового поля, наблюдаемого на конических профилях при просвечивании блоков, различающихся раскрытостью вертикальных шероховатых трещин (0,01; 0,04; 0,07; 0,1 мм) с одинаковыми значениями гидравлически связанной матричной пористостью ($K_{мп} = 2\%$). Пустоты трещин и пор заполнены масляным флюидом. Наблюдаемые угловые изменения кинематических и динамических характеристик продольной волны отображают степень различия ёмкостных характеристик трещин между порово-трещинными моделями. На соответствующих графиках (см. рис. 5) видно, что с увеличением раскрытости трещин и уменьшением угла θ , т. е в направлении оси симметрии трещин максимальные изменения скорости P -волны при раскрытости трещин 0,1 мм достигают 12%. Наиболее информативными признаками диагностики вертикальной трещиноватости являются динамические характеристики продольной волны и прежде всего возрастание декремента поглощения со смещением спектра в сторону низких частот с увеличением азимутального угла θ . Наблюдается линейная зависимость декремента поглощения от раскрытости трещин. При больших углах, равных 30 - 40°, декремент поглощения в случае раскрытости трещин 0,1 мм возрастает до значений η 0,7 - 0,8. Важно отметить, что при одинаковых значениях ёмкостных характеристик трещин и матричной пористости в динамических характеристиках P -волны в большей степени проявляется

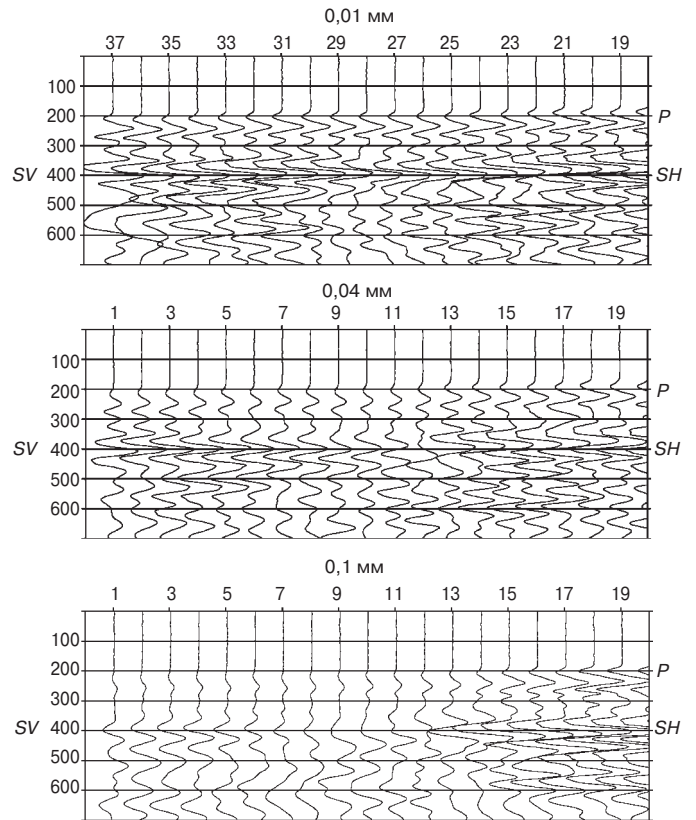


Рис. 4. Примеры записи волнового поля в системе Fz - Uz на дуговых профилях при просвечивании фрагментарных контактирующих порово-трещинных блоков с вертикальной шероховатой трещиноватостью, различаемые плотностью трещин, при одинаковых значениях матричной пористости ($K_{мп} = 2\%$): гидравлически связанное пустотное пространство блоков насыщено масляным флюидом

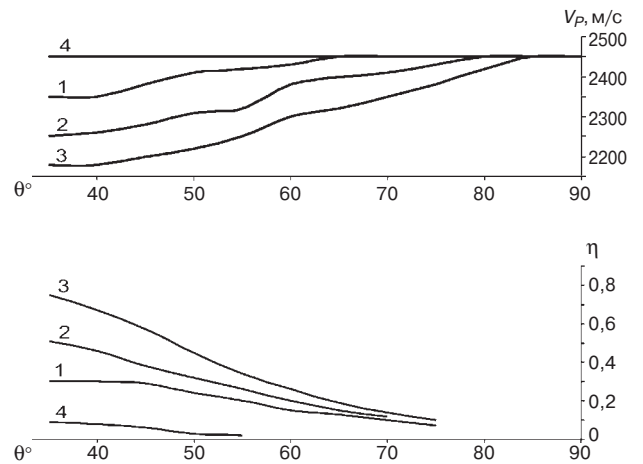


Рис. 5. Азимутальные изменения индикатрисы скорости и декрементов поглощения продольной волны при просвечивании порово-трещинных блоков (на рис. 4): угловые изменения декремента поглощения и скорости продольной волны условно отображают степень различия ёмкостных характеристик трещин между порово-трещинными блоками при одинаковых значениях матричной пористости; плотность трещин блоков: 1 - 3%; 2 - 6%; 3 - 9%; 4 - менее 1%; θ - угол между базой наблюдения и осью симметрии

трещинная “пористость”. По значению угловых изменений декремента поглощения P -волны возможно установление соотношения между значениями трещинной и матричной пористости. С увеличением ёмкостных характеристик шероховатой трещиноватости возрастают различия в значениях скорости и поглощении между SH - и SV -волнами, при этом отношение скоростей поперечных волн может быть важным параметром в оценке коэффициента трещинной пористости.

Составная базовая модель. Созданные и апробированные новые конструкции фрагментарных объёмных моделей трещиноватых и порово-трещиноватых систем в виде отдельных модулей включены в однородную объёмную модель, при обосновании параметров которой использовались данные о типовых сейсмоакустических моделях коллекторов Юрубченского месторождения Восточной Сибири. Коллекторы залежей углеводородов, приуроченные к кровле рифея и подошве венда, характеризуются трещиновато-кавернозной пористостью с существенным преобладанием вертикальной трещиноватости при значениях общей трещиноватой пористости коллекторов 0,4 - 1,5%. По отношению к вмещающим карбонатным отложениям газонефтенасыщенные коллекторы по данным метода АК отличаются высокими значениями декремента поглощения и слабой скоростной контрастностью продольных волн: значения скорости изменяются не более чем на 5%. Существенным является перекрытие продуктивной толщи высоко-скоростным слоем с неоднородной шероховатой структурой контакта слоёв.

В работе [6] на основе детального анализа данных АК ЮТЗ, а также реальных данных наземных наблюдений авторы приходят к выводу, что применяемые традиционные технологии сейсморазведки при поисках коллекторов в подобных средах неинформативны. К подобному выводу приходит и Л. Д. Гик [2] при оценке возможности прогнозирования залежи углеводорода по полю отражённой волны от подстилающего реперного горизонта. Ограниченные возможности применяемых сейсмических технологий автор связывает с недопустимыми искажениями, вносимыми неоднородным контактом слоя над залежью в зондирующий сигнал при определении важнейшего параметра - декремента поглощения целевого объекта. В последние годы в качестве альтернативы опробуется методика, построенная на извлечении полезной информации о целевом объекте из рассеянной компоненты волнового поля путём реализации фокусирующего преобразования сейсмограмм (F-технология) [12]. По утверждению авторов, предложенная для использования в Восточной Сибири технология позволяет из всего набора наблюдаемых на сейсмических разрезах волновых аномалий идентифицировать рассеянные волны, непосредственно сформированные целевыми объектами. В работах [7, 10] рассматриваются результаты поляризационных наблюдений ВСП (МВС ВСП) в скважинах ЮТЗ. На основе исследований особенностей распространения SH - и SV -волн авторы приходят к заключению о возможных перспективах применения многоволновой сейсморазведки при поисках и

диагностике порово-трещинных коллекторов в карбонатном разрезе Восточной Сибири.

Многозначность результатов интерпретации данных и существующие разногласия в оценке перспектив применяемых методик при поисках слабоконтрастных коллекторов Восточной Сибири явились основанием для тестирования некоторых сейсмических технологий на составной физической модели с включениями фрагментарных порово-трещинных моделей, по параметрам адекватных сейсмическим моделям коллекторов ЮТЗ.

Введённые в составную модель исследуемые фрагментарные порово-трещинные модели с монетообразной и шероховатой трещиноватостью характеризуются коэффициентами трещинной пористости в пределах $K_{\text{тр}} = 3\%$, при одинаковых небольших значениях матричной пористости $K_{\text{мп}} 1,2 - 2\%$. По отношению к вмещающей среде различия скорости продольной волны не более 5%, что не противоречит реальным данным ЮТЗ. Пустотное порово-трещинное пространство модели насыщено масляным наполнителем. Задача эксперимента - оценить, насколько существенны наблюдаемые над фрагментарными моделями волновые аномалии при локализации и диагностике трещиноватости слабоконтрастных порово-трещинных блоков. Для решения этой задачи проведены исследования волновых полей, формируемых как непосредственно при отражении (рассеянии) от порово-трещинных блоков, так и при их просвечивании в поле восходящих отражённых волн от нижерасположенной границы (свободная поверхность). Многоволновые наблюдения проводились при различных сочетаниях пар источник-приёмник: Fz-Uz, Fx-Ux, Fy-Uy.

Прежде всего остановимся на некоторых результатах наблюдений над одной из рассмотренных выше фрагментарных моделей (см. рис 4). Блок 4 размером $12 \times 12 \times 6$ см в составной модели, расположенный на глубине 18 см (см. рис. 1), характеризуется шероховатой трещиноватостью с раскрытостью трещин 0,05 мм и плотностью трещин $K_{\text{т}} 3 - 4\%$. Гидравлически связанное пустотное пространство блока насыщено масляным флюидом. Важно отметить, что по отношению к вмещающей среде блок характеризуется слабой скоростной контрастностью: различия по скорости продольной волны не превышают 4%.

На рис. 6, а приведена система упрощённого варианта 3D-многокомпонентных веерных наблюдений на круговом профиле способом общей средней точки путём симметричного перемещения (через 5°) источника и приёмника относительно проекции центра фрагментарной модели порово-трещинного блока. В результате азимутальных наблюдений в системе Fz-Uz установлено, что при офсете наблюдений ($R = 0,7 H$) угловые изменения времени регистрации продольных отражённых волн при просвечивании блока не превышают 1 - 2% (рис. 6, б). В большей степени скоростная анизотропия объекта проявилась в угловых изменениях амплитуды записи P -волны. При освещении трещиноватости под углом $\theta = 60^\circ$ в полном соответствии с данными наблюдений на фрагментарных моделях амплитуда записи P -волны уменьшается в два раза.

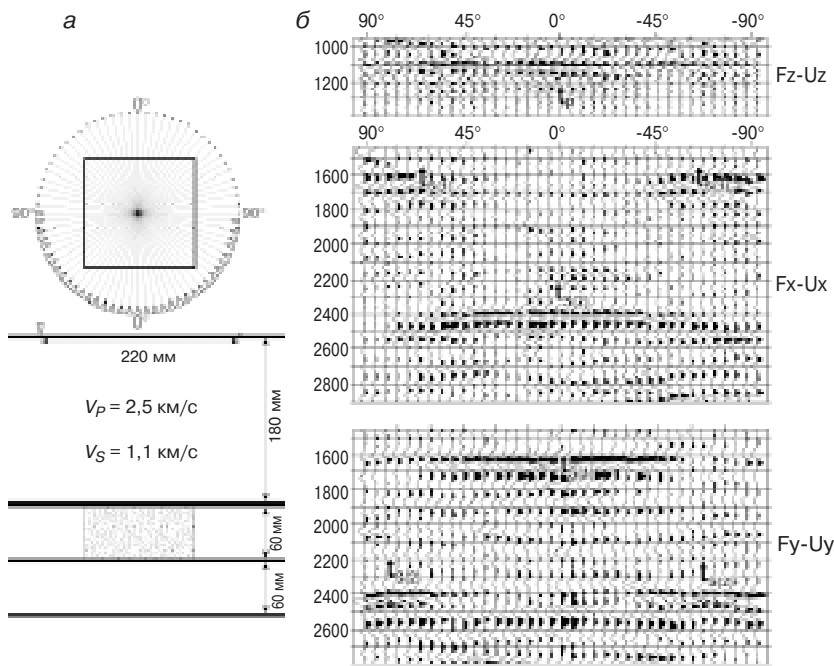


Рис. 6. Схема азимутальных наблюдений способом общей средней точки на круговом профиле ($R = 0,7H$) при симметричном перемещении ПВ-ПП относительно центра проекции блока 4 (а) и записи продольных (t_P) и поперечных отражённых волн (t_{S1} , t_{S2}), полученные в системе Fz-Uz; Fx-Ux, Fy-Uy (б):

на фрагментах записи в системах Fx-Ux, Fy-Uy прослеживаются поперечные волны (t_{S2}), отражённые от границы, расположенной глубже нижнего контакта блока, и поперечная волна (t_{S1}), отражённая от шероховатой поверхности трещинного блока

С высокой степенью достоверности анизотропия исследуемого порово-трещинного блока 4 при наблюдении в системах Fx-Ux, Fy-Uy проявилась в поле поперечных отражённых волн. Важно отметить, что при слабой скоростной контрастности исследуемого блока на приведённых записях фиксируется интенсивная поперечная волна (t_1), отражённая от шероховатой поверхности трещинного блока и поляризованная ортогонально к оси симметрии трещин. На фрагментах записи азимутальных наблюдений (см. рис. 6, б), прослеживаются поперечные волны просвечивания (t_2), отражённые от границы, расположенной глубже нижнего контакта блока. По направлению поляризации излучаемых поперечных отражённых волн SH и SV относительно оси симметрии трещиноватости надёжно прогнозируется положение и направление ориентации трещин.

В дополнении к верным наблюдениям блок 4 был пересечён двумя профилями, ориентированными вдоль и ортогонально оси симметрии трещин (см. рис. 1). Использовалась многократная система наблюдений при расстоянии между источниками 2 см и между приёмниками 1,0 см. Размер базы наблюдений 30 см соответствует глубине залегания отражающей границы. Наблюдения проведены при различных сочетаниях направленности источника возбуждения и приёма колебаний в системах Fz-Uz, Fx-Ux, Fy-Uy.

Из-за слабой скоростной контрастности блока продольные отражённые (рассеянные) волны, связанные как с контактами, так и с внутренними неоднородностями блока, на записях временного разреза Fz-Uz не установлены. Положение блока фиксируется по аномальным изменениям амплитуды записи волны, отражённой от опорной границы, расположенной ниже исследуемого блока (рис. 7). Подобно результатам исследований на фрагментарных моделях при незначительных различиях в кинематических характеристиках P -волны между ортогональными профилями, наблюдается значительное уменьшение амплитуды записи отражённой волны при распространении через порово-трещинный блок. Вместе с тем из-за относительно небольшого офсета наблюдений различия в амплитудах записи P -волны между ортогональными профилями оказались не столь значительными для надёжного установления анизотропии порово-трещинного блока.

Положение и трещиноватость фрагментарного блока 4 достаточно чётко отображены в поле поперечных волн. Прежде всего на временных разрезах Fx-Ux и Fy-Uy (см. рис. 7) в зависимости от положения профиля относительно оси симметрии трещинного блока, подобно рис. 6, чётко фиксируется положение шероховатой поверхности блока в поле поперечной отражённой волны (t_1), поляризованной ортогонально к оси симметрии трещин. Сам факт регистрации интенсивной поперечной волны, отражённой от поверхности блока, и направление её поляризации являются важным диагностическим признаком положения в разрезе блока и направления распространения трещиноватости.

Анизотропия порово-трещинного блока установлена также и при просвечивании блока в поле поперечных волн, отражённых от подстилающей границы. На временных разрезах Fx-Ux и Fy-Uy (см. рис. 7) проявился важнейший диагностический признак вертикальной трещиноватости - различие скоростей SH - и SV -волн. На записях ортогональных профилей наблюдается зависимость между направлением поляризации поперечных волн от направления системы источник-приёмник относительно оси симметрии вертикальной трещиноватости. Так, на временном разрезе Fx-Ux, полученном на профиле в направлении трещиноватости, наблюдается отражённая SH -волна, поляризованная вдоль трещин с небольшим возрастанием времени и слабой флуктуацией амплитуд записи в окрестности блока, а на разрезе Fy-Uy фиксируется эффект запаздывания поперечной SV -волны, что отвечает известным теоретическим предпосылкам волнового поля анизотропных сред.

Представляет интерес особенность волнового поля, наблюдаемого на временных разрезах при пересечении

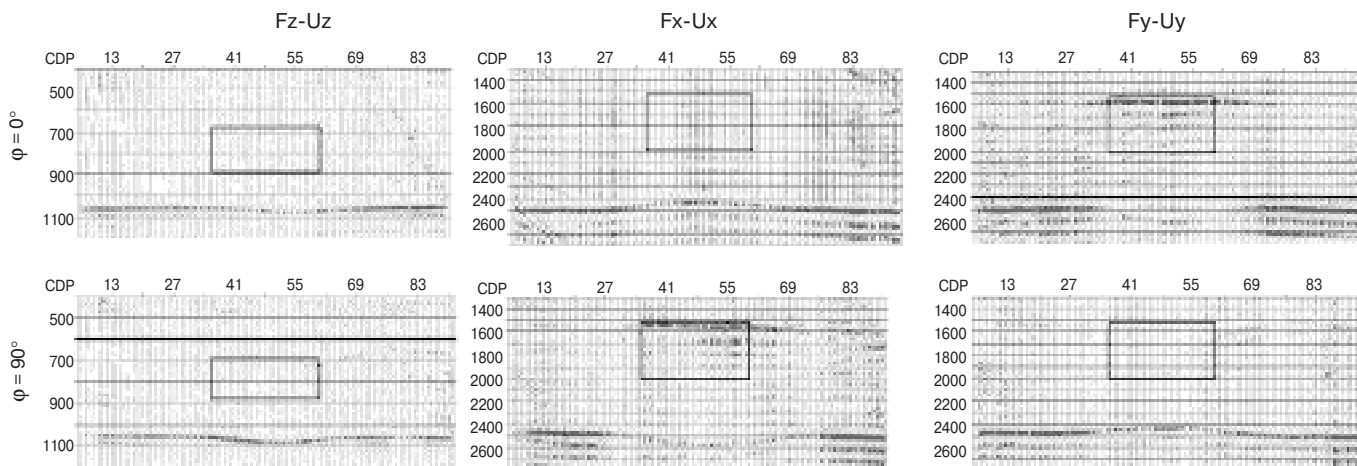


Рис. 7. Временные разрезы ОГТ ортогональных профилей в системах Fz-Uz, Fx-Ux, Fy-Uy при пересечении порово-трещинного блока 4 (см. рис. 1) с флюидонасыщением вдоль и вкрест оси симметрии трещин: блок характеризуется раскрытостью шероховатых трещин 0,04 мм и матричной пористостью $K_{мп} = 2\%$

под углом 45° к оси симметрии трещиноватости трёх фрагментарных моделей порово-трещинных блоков, в т. ч. и блока 4 (рис. 8). При одинаковых значениях матричной пористости блоки различаются между собой параметрами и типом трещиноватости. Блок 1 составлен из плоских трещин (0,02 мм), а блоки 3 и 4 из шероховатых трещин, различаемых параметрами шероховатости.

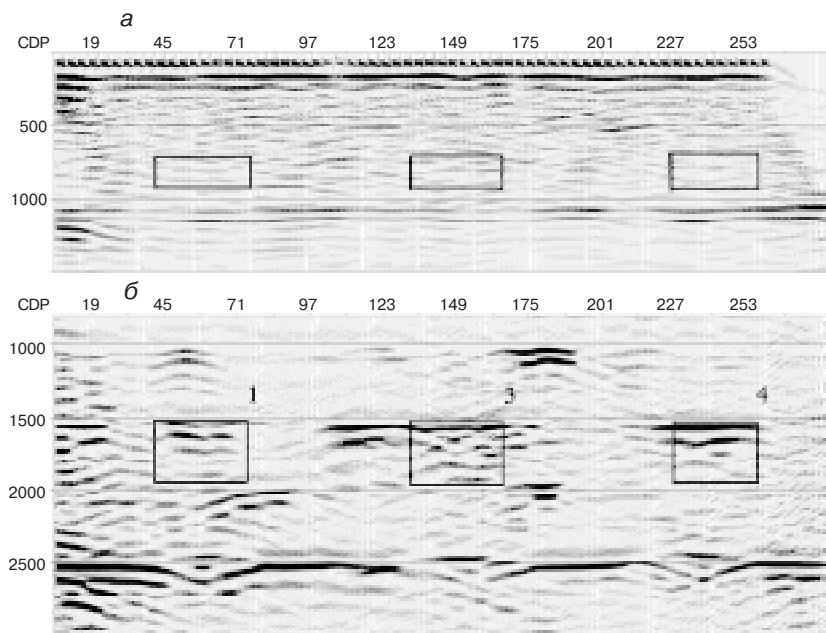


Рис. 8. Временные разрезы ОГТ, полученные на профиле 3 в системах Fz-Uz (а) и Fx-Ux (б) при пересечении под углом 45° трёх флюидонасыщенных порово-трещинных блоков, при одинаковых значениях матричной пористости и различаемые трещинной плотностью: блоки: 1 - 1,2%, 3 - 2,5%; 4 - 3%

На рис. 8, а приведён временной разрез, полученный в системе Fz-Uz. Ввиду слабой скоростной контрастности блоков продольные отражённые волны, в т. ч. и рассеянные, сформированные непосредственно на контактах и неоднородностях порово-трещинных блоков, на временных разрезах не наблюдаются. Ввиду относительно небольшого офсета наблюдений положение блоков слабо проявились и в аномалиях поля “восходящей” отражённой волны от опорной границы. Наблюдаемые на временном разрезе в окрестности блоков временные аномалии отражений не более 3 - 5%.

При наблюдении в системах Fx-Ux, и Fy-Uy в соответствии с приведёнными выше данными положение и трещиноватость порово-трещинных блоков надёжно фиксируются в аномалиях записи поля поперечных волн. На рис. 8, б приведён пример временного разреза, полученный в системе Fx-Ux. Прежде всего, на временном разрезе в поле отражённой SH-волны достаточно уверенно прослеживается верхний контакт блоков. С другой стороны, трещиноватость блоков чётко фиксируется и в аномалиях поля поперечной волны, отражённой от опорной границы. В окрестности каждого блока наблюдается одинаковая интерференционная “линзовидная” запись схождения и расхождения “расщеплённой” поперечной волны, сформированной в результате изменения направления поляризации волны относительно вертикальной трещиноватости при распространении через блоки.

Подводя итог проведённым исследованиям, следует отметить, что полученные результаты удовлетворительно согласуются с

реальными данными и выводами ряда авторов о возможности и ограничениях сейсмических технологий, применяемых при поисках коллекторов в районах Восточной Сибири.

Результаты проведённого тестирования 2D-наблюдений позволяют заключить, что при поисках слабоконтрастных порово-трещинных объектов применяемые традиционные сейсмические технологии моноволновых наблюдений методом продольных отражённых волн при небольшой величине офсета наблюдений мало информативны. Нет уверенности и в перспективах использования рассеянной компоненты волнового поля при идентификации и прогнозе анизотропных характеристик, наблюдаемых на разрезах динамических аномалий, отождествляемых с трещиноватостью среды. Не отрицая положительного значения рассеянной компоненты волнового поля при локализации разнообразных неоднородных объектов в регулярно-слоистых моделях, её роль, на наш взгляд, переоценена при “разбраковке” динамических аномалий и диагностике их характеристик. И это может быть связано не только с возможным присутствием на разрезах “ложных” аномалий рассеянных волн, сформированных в т. ч. на шероховатой поверхности слоя, перекрывающего залежь, но и с направлением излучения рассеянных волн от вертикальных трещин, энергетические характеристики которых определяются в основном удельной поверхностью трещин. К объектам рассеяния авторы относят неоднородности, отождествляемые с вертикальными микротрещинами и открытой пористостью, собранные в определённые композиции, при этом к поисковому признаку относят энергетические характеристики наблюдаемых на разрезах аномалий рассеянных волн. На приведённых временных разрезах физического моделирования можно видеть, что даже в идеальном случае при наблюдениях в однородной среде на записях Fz-Uz отражённые (рассеянные) волны, непосредственно связанные как с контактами, так и с внутренними неоднородностями порово-трещинных блоков, не наблюдаются. Отсутствие на временных разрезах признаков рассеянного поля, непосредственно сформированного на блоках, обусловлено слабой скоростной контрастностью блоков и незначительным влиянием на формирование рассеянной компоненты волнового поля ёмкостного пространства, определяемого малой матричной пористостью и диаграммой направления излучения вертикальных рассеивающих элементов. Очевидно, что обнаружение рассеянных волн, сформированных на трещинах, возможно только при больших офсетах наблюдений, что может привести к существенному снижению разрешающей способности метода.

Для разрешения существующих противоречий о разведочных возможностях в Восточной Сибири рассеянных волн (F-технология) в последующем целесообразно провести тестирование этой технологии на созданной составной модели с возможностью корректировки параметров исследуемых фрагментарных моделей.

В полном соответствии с реальными данными поляризационных наблюдений в скважинах проведённое

тестирование сейсмических технологий иллюстрирует высокую информативность и единственность метода многоволновой сеймики при диагностике слабоконтрастных порово-трещинных объектов. Трещиноватость объектов достаточно надёжно проявляется в поле поперечной волны, как непосредственно отражённой от шероховатой поверхности трещинного блока, так и в наблюдаемом эффекте расщепления отражённой волны от нижерасположенной границы при распространении через блок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенные конструкции *порово-трещинных* физических моделей имитируют объёмные порово-трещинные геологические среды с гидравлически связанным пустотным пространством. При сохранении подобия размера изометричных пор реальным объектам физические модели отличаются возможностью изменения параметров трещин (размер, форма, раскрытость) и порового пустотного пространства с произвольно меняемым типом насыщения. Независимо от параметров трещин и структуры трещиноватости рассматриваемых физических моделей характеристики наблюдаемого волнового поля адекватны условиям трансверсально-изотропной среды. Предложенные конструкции моделей раскрывают новые возможности физического моделирования в исследовании признаков обнаружения и диагностики параметров порово-трещинных объектов.

Исследованиями, проведёнными на фрагментарных моделях с монетообразными трещинами, размеры которых существенно меньше сечения первой зоны Френеля, установлено существенное влияние удельной поверхности трещин на поле рассеянных волн, формируемых трещиноватой системой. При этом основным фактором, влияющим на формирование поля рассеянных волн поля как при прохождении, так и отражении непосредственно от поверхности трещиноватых систем, являются геометрические размеры и форма микротрещин.

При фиксированном изменении раскрытия трещин основной вклад в волновое поле вносит механически податливые “шероховатые трещины” - контакты пластин с ненулевыми зазорами, величину которых, а следовательно, и “трещинную пористость” можно менять произвольно. Угловые изменения декремента поглощения продольной волны отображают степень отличия ёмкостных характеристик трещин от матричной пористости. С увеличением ёмкостных характеристик трещиноватости возрастают различия в значениях скорости и поглощения между *SH*- и *SV*-волнами.

Созданная “большая” составная разборная физическая модель с включением в виде сменных модулей с сохранением заданных параметров фрагментарных моделей порово-трещинных систем открывает перед моделированием перспективы в решении научно-исследовательских и прикладных методологических задач при тестировании и оптимизации современных и вновь создаваемых технологий получения и обработки данных сейсморазведки.

Результаты тестирования сейсмических наблюдений, проведённых на поверхности составной модели, позволяют прийти к заключению, что обнаружение и диагностика слабоконтрастных порово-трещинных объектов при малых офсетах наблюдений возможны только на основе реализации методов многоволновой сейсморазведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гик Л. Д., 1997, Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах: Геология и геофизика, **38**, **4**, 804 - 815.
2. Гик Л. Д., 2000, Использование результатов физического моделирования для диагностики карбонатных коллекторов Восточной Сибири: Геология и геофизика, **41**, **2**, 268 - 279.
3. Караев Н. А., Лукашин Ю. П., Прокатор О. М., Семенов В. П., 2008, Физическое моделирование трещиноватых сред: Технологии сейсморазведки, **2**, 64 - 73.
4. Караев Н. А., Козлов Е. А., Караев Г. Н., Лукашин Ю. П., Прокатор О. М., Семенов В. П., 2008, Физическое моделирование порово-трещинных объектов: Технологии сейсморазведки, **3**.
5. Козлов Е. А., 2008, Модели среды в разведочной сейсмологии: Тверь, ГЕРС.
6. Кокшаров В. З., Нефедкин Ю. А., Курьянов Ю. А., 2004, Использование частотного акустического зондирования для изучения трещинных коллекторов: Геофизика, Спецвыпуск.
7. Кузнецов В. М., 2003, Многоволновая сейсморазведка - новые возможности и перспективы: Приборы и системы разведочной геофизики, **3**.
8. Кузнецов О. Л., Курьянов Ю. А., Чиркин И. А., Шленкин С. И., 2004, Сейсмический локаатор бокового обзора: Геофизика, Спецвыпуск.
9. Кремлев А. Н., Ерохин Г. Н., Стариков Л. Е., Зверев М. А., 2008, Прогноз коллекторов трещинно-кавернозного типа по рассеянным сейсмическим волнам: Технологии сейсморазведки, **3**.
10. Шехтман Г. А., Кузнецов В. М. и др., 2001, Прогноз микро- и макроструктуры околоскважинного пространства в условиях Юрубченско-Токманской зоны на основе комплексирования ВСП и пластовой наклонометрии: Гальперинские чтения-2001: М., ЦГЭ.
11. Karaev N. A., Kozlov E. A., Karaev G. N., Lukashin Y. P., Prokator O. M., Semenov V. M., 2010, Physical modeling supports testing of seismic techniques for porous-fractured reservoir characterization: EAGE, Conference, Expanded, Abstracts B47.
12. Pozdnyakov V. A., Krasilnikova N. B., Antonenko A. A., 2010, Scattered wave energy attribute application to conceptual oil field model construction: EAGE, Conference, Expanded, Abstracts P25.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Назим Алигейдарович КАРАЕВ - главный научный сотрудник ФГУНПП "Геологоразведка", доктор физ.-мат. наук.

Юрий Петрович ЛУКАШИН - главный научный сотрудник ФГУНПП "Геологоразведка", доктор физ.-мат. наук.

Гейдар Назимович КАРАЕВ - заведующий лабораторией ФГУНПП "Геологоразведка".

Олег Миланович ПРОКАТОР - старший научный сотрудник ФГУНПП "Геологоразведка".