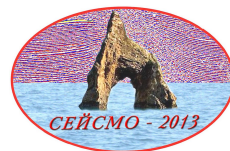


А. М. Кузин, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия), *amkouzin@ya.ru*



ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯННЫХ ВОЛН В ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В статье приводится сводка результатов по физическому моделированию рассеянных волн из различных работ, и что весьма важно, выполненных по схожей методике и на схожей экспериментальной (технической) базе. На нескольких примерах интерпретации данных многократных сейсмических наблюдений показано, что физическое моделирование дает возможность корректно проводить обоснование особенностей волновой картины.

Ключевые слова: физическое моделирование, трещинно-пористая среда, рассеянные волны, анизотропия.

Введение

В настоящее время регулярно публикуется много работ по моделированию волновых полей в пористых и трещиноватых средах. Наибольшее число из них посвящено математическому моделированию резервуаров углеводородов, аппроксимируемых анизотропной, трещиноватой средой. Публикаций по физическому моделированию значительно уменьшилось, что в первую очередь связано с совершенствованием возможностей математического моделирования. Однако практическое значение физического моделирования остается по-прежнему весьма велико, оно является главным аргументом в интерпретации.

В 80–90 годы, предвосхищая широкое внедрение в практику полевых пассивных и активных сейсмических исследований использования рассеянных волн, была выполнена серия работ по физическому моделированию в ИФЗ РАН, ВИРГ, ИГФ СО РАН, в Институте нефти и газа им. Губкина.

С 90-х годов региональные сейсмические исследования почти полностью стали проводится по методу общей глубинной или средней точки (МОГТ), что позволило изучать геологические образования,

формирующие поле зеркальных и рассеянных волн. По своей представительности в поле отраженных волн консолидированной коры рассеянная компонента не уступает зеркальной. Наличие в геологической среде мелкомасштабных неоднородностей, формирующих поле рассеянных волн и создающих мутность среды, было описано в известной работе [14]. В этой монографии были введены понятия коэффициента мутности, декремента мутности и прозрачности, по аналогии с декрементом поглощения и добротностью, что подготовило теорию для описания областей динамически интенсивной, хаотической и “бледной” сейсмической записи, наблюдаемой на временных разрезах МОГТ. Казалось бы, что результаты физического моделирования должны составить важную часть в обработке и интерпретации данных МОГТ в сложно построенных гетерогенных средах, однако этого не произошло.

К основным параметрам пористых и трещиноватых сред относятся: плотность пор и трещин, раскрытость трещин, проницаемость, флюидонасыщенность, фазовое состояние наполнителя, напряженное

состояние. Они имеют основополагающее значение в изучении разрывных нарушений. Значительный вклад в результирующее поле от разрывных нарушений вносят рассеянные волны. Теоретически в работе [10] была обоснована возможность выделения в интерференционном поле дифрагированных волн малоамплитудных разрывных нарушений путем частотной фильтрации. В работах [1, 20] и экспериментально в работе [22] было показано, что в общем случае трещиноватая среда является азимутально-частотным фильтром. Для сравнительно узкополосного сигнала, в зависимости от соотношения l/λ (характерный размер неоднородности; λ – длина волны), среда может представлять собой фильтр низких частот, фильтр высоких частот или режекторный фильтр в том случае, когда частота максимума спектра близка к собственной частоте среды. Как в работах по интерпретации данных региональных исследований, так и в данных по интерпретации волновых полей от разрывных нарушений результаты физического моделирования присутствуют за редким исключением.

Возможно, одним из моментов явилось отсутствие обобщений хотя бы из наиболее известных работ по моделированию и примеры их использования. Представления о влиянии на сейсмическое поле различных факторов, как правило, обосновываются на результатах физического моделирования пористых и трещиноватых сред. Ниже представлена краткая сводка результатов физического моделирования по закономерностям и особенностям рассеянных волн в этих средах, полученных в работах со сходными условиями экспериментов, а также практические следствия для интерпретации данных полевых наблюдений.

Обобщение результатов моделирования

1. Длина волны значительно больше неоднородности

1.1. Хаотическое распределение трещиноватости. Экспериментальные исследования подтвердили, что мелкомасштабные неоднородности являются причиной

изотропного рассеяния. Под действием нагрузки анизотропия среды проявляется как для ориентированной трещиноватости, так и для случайно ориентированных трещин [3].

1.2. Ориентированное распределение трещиноватости. В модели с упорядоченной структурой (“микроморфная” модель трещиноватых среды) преобладающая частота проходящих волн стремится к одной и той же величине, независимо от частоты сигнала. Результирующая частота определяется пространственным распределением, направленностью и размерами дефектов [27]. Процесс фильтрации сигналов в среде с ориентированной трещиноватостью сопровождается дисперсией фазовой скорости, обуславливающей наблюдаемые изменения формы и длительности импульсов упругих волн. Дисперсию такого рода, обусловленную пространственной периодичностью среды, в отличие от объемной дисперсии, вызываемой поглощающими свойствами среды, называют пространственной [5] или квазидисперсией [13, 17, 21].

Эксперименты по изучению дисперсионных эффектов по фазовой характеристике исследуемой среды показали связь дисперсии скорости с характером фильтрации сигналов в среде, но четкой зависимости получено не было [22]. Для модели среды с параллельными трещинами установлена различная величина тензочувствительности (производная по давлению) для кинематических и динамических параметров [2]. При вариациях угла между трещинами и осью нагружения от 0 до 90° изменения скорости продольной волны не превышали 6 % при нагружении, а эффективный коэффициент затухания изменялся на 30–40 %. При нагрузках анизотропия наблюдалась не только в значениях самих параметров, проявлялась анизотропность самих зависимостей [4].

Для ориентированной трещиноватости в работе [22] предложена и рассмотрена следующая классификация среды: 1 – при $l/\lambda > 1$ среда упорядочена, неоднородна и анизотропна; 2 – для $l/\lambda \ll 1$ среда эффек-

тивна, однородна и анизотропна; 3 – при $l/\lambda \sim 1$ – переходная область свойств.

В длинноволновом приближении ($l/\lambda < 0,1$) индикатрисы скоростей приобретают эллипсоподобную форму. При этом с увеличением плотности трещин анизотропность среды по скорости монотонно возрастает. Среда при стремлении l/λ к 0 становится эффективно-однородной, анизотропной средой и является фильтром низких частот. Среда с высокой плотностью трещин, будучи эффективно-однородной, анизотропной, проявляет значительную анизотропию по скорости. Для амплитудных и спектральных характеристик может быть близка к изотропной, особенно при $l/\lambda \ll 0,1$.

2. Длина волны приблизительно равна размеру неоднородности

Из теории известно [7, 14, 25, 26], что основной вклад в поле рассеянных волн вносят неоднородности, сопоставимые с длиной волны, что находит подтверждение в эксперименте. При моделировании преобладающая частота отраженного импульса рассеянной волны уменьшается при увеличении длины трещины до размера длины волны и не меняется, оставаясь равной преобладающей частоте падающей волны [19].

При $l/\lambda = 1$ как при хаотическом, так и при ориентированном распределении трещиноватости чувствительность динамических параметров прямой волны к изменению количества трещин на порядок меньше, чем к изменению угла падения. Эксперименты в различных частотных диапазонах, волновых пакетах разной длительности, плотности трещин и их ориентации для трещиноватой среды с равномерным расположением и разным количеством трещин, а также со случайным расположением ориентированных трещин позволили выделить три области [2]:

– Первая (область однократного рассеяния) характеризуется нулевым углом (относительно трещин) и всеми вариациями плотности трещин, а также минимальной плотностью трещин и всеми углами.

В этой области наблюдается наиболее сильные флуктуации параметров при относительно небольшом изменении среднего уровня.

– Вторая область (область многократного рассеяния) определяется промежуточными значениями плотности трещин и углов. Ей соответствует устойчивое равномерное изменение параметров.

– Третья область (область диффузионного рассеяния) с высокой плотностью трещин и большими углами характеризуется скачкообразным изменением параметров по сравнению с первой и второй областями. Здесь выявлен механизм захвата трещиноватой средой упругой энергии при больших углах падения и высокой плотности трещин. Он проявляется в увеличении длительности волнового пакета (коды колебаний), аномальном увеличении длительности трасс, которая зависит от количества рассеянной энергии (диффузное рассеяние).

Моделирование временных разрезов от гетерогенных сред описано в работах [6, 8, 9]. Под гетерогенностью понимается неравномерность распределения вещества и физических свойств пород в виде неоднородных включений всех масштабов – от микро- до макронеоднородностей [15, 16]. Временные разрезы, полученные от моделей гетерогенных блоков с ориентированным и хаотическим распределением локальных элементов, по волновой картине оказались схожими. Значительное подобие отмечено при сопоставлении временных разрезов модели гетерогенного блока с хаотическим распределением элементов и временным разрезом по профилю, проходящему через интрузивный массив [9]. По результатам моделирования волновых полей над гетерогенными зонами (разломы, надвиги, системы складок и т. п.) были сформулированы следующие положения [6, 8, 9]. Класс гетерогенных моделей является более общим, по сравнению с регулярными слоисто-блоковыми, центральное место занимают гетерогенные системы со среднемасштабными (относительно длины волны) включени-

ями. Основным типом волн, формируемых гетерогенными системами, являются рассеянные волны, которые содержат в себе фрагменты отражений, близкие к зеркально отраженному полю.

Квазипорядоченные гетерогенные зоны. Суммарное поле, образованное ими, представлено одним или несколькими волновыми пакетами, характеризуемыми фазовыми и групповыми свойствами. Для фазовых характеристик имеет место приближенный принцип локальности (локальные фазовые характеристики пакета определяются диаграммой рассеяния полей от элементов зоны). Групповые свойства определяются геометрией зоны, диаграммой рассеяния элементов, а также внутренней структурой зоны. Различия между групповой и фазовой скоростью возрастают с увеличением разности углов наклона элементов в зоне. Для крутопадающих зон групповая скорость может быть меньше скорости в среде.

Диффузные зоны. Волновое поле носит квазирегулярный характер и справедлив принцип локальности. По отношению к гетерогенной зоне поле в среднем симметрично относительно минимума группового годографа. Установлена высокая стабильность волновых пакетов над субвертикальными зонами и большое подобие с отражением от наклонного однородного слоя.

Для *гофрированных зон* поле представляется в виде волновых пакетов, и групповые годографы являются огибающими к системе фазовых годографов.

2.1. Хаотическое распределение трещиноватости. В среде с различным распределением плотности трещин при соотношении $l/\lambda = 2$ были установлены следующие эффекты [3]:

1. С увеличением плотности трещин скорости продольных и поперечных волн уменьшаются.

2. Наблюдается эффект обтекания волной области трещиноватости (при определенной плотности трещин). В первых вступлениях регистрируется высокочастотная волна.

3. В трещиноватой среде наблюдается затухание высокочастотных составляющих спектра. При увеличении количества трещин происходит перераспределение мощности колебаний в низкочастотном диапазоне спектра со смещением максимума спектра в область низких частот. Отмечается возникновение резких спектральных пиков в волновом поле. Обмен энергией между различными частотными диапазонами сопровождается сохранением относительной мощности колебаний, пропущенных трещиноватой средой.

4. При упругих деформациях модели (размеры трещиноватой области лежат в интервале 0,7–3,5 длин волн), соответствующих диапазону нагрузок, аналогичных природным – приливным явлениям, собственным колебаниям Земли, наблюдается следующее:

4.1. В направлении деформации сжатия скорость и преобладающая частота монотонно меняются с увеличением нагрузки. Скорость продольной волны увеличивается, а преобладающая частота уменьшается.

4.2. При растяжении наблюдается обратная зависимость. При монотонном уменьшении скорости распространения волны преобладающая частота меняется не монотонно: на отдельных участках она увеличивается, на других – уменьшается. Это означает, что при напряженном состоянии имеются области, в которых скорость и частота находятся как в прямой, так и в обратной зависимости между собой. Подобное поведение скоростей и частот в первых вступлениях было описано при ультразвуковых наблюдениях около Карасуйского надвига [18].

5. Для моделей (включения шаровой формы) случайно-неоднородной среды с низкой плотностью включений при многократном рассеянии влияние на спектральный состав Р- и S-волн (для Р-волн $0,80 < d/\lambda < 1,63$; для S-волн $0,21 < d/\lambda < 0,41$) числа и размеров рассеивателей приводит к следующим эффектам [23, 24]:

5.1. Максимальные значения в амплитудных спектрах амплитуд продольных

Ар- и поперечных As-волн убывают с увеличением N (число включений в объеме модели) по закону, близкому к линейному, в координатах $N, \ln A$.

5.2. Зависимость $A(N)$ тем сильнее, чем больше d/λ (размер включения), независимо от типа волны.

5.3. С увеличением d/λ значения Ар и As падают; скорость падения при больших d/λ выше, чем при меньших.

5.4. При увеличении базы прозвучивания рост Ар и As наблюдается в случае, когда прямая волна интенсивно подпитывается за счет многократного рассеивания.

5.5. С увеличением числа и размеров включений усложняется волновая картина и увеличиваются амплитуды колебаний между вступлениями Р- и S-волн.

2. 2. Ориентированное распределение трещиноватости. 1. Установлена корреляция между максимумами в спектральной характеристике по отношению к периоду ориентированных трещин [2].

2. Общей особенностью оценок кинематических и динамических параметров является их существенная анизотропия, которая зависит от угла падения волны на трещины, а также от их плотности. Характер изменений при малых углах (до 45°) отличается от изменений при углах, больших 45° .

3. Индикатрисы скоростей с уменьшением l/λ и увеличением базы измерений постепенно сглаживаются [22].

4. Индикатрисы амплитуд показывают резкое уменьшение амплитуды с увеличением угла падения к плоскости трещин [22].

5. Коэффициент анизотропии по амплитуде значительно выше, чем по скорости, и достигает максимума в переходной области ($l/\lambda \sim 1$). Частично это обусловлено возрастанием амплитуды вдоль трещин при увеличении их плотности или уменьшении соотношения l/λ за счет изменения характера геометрического расхождения и канализации трещинами энергии волны вдоль своего простирания [22].

6. Анизотропия спектральных характеристик определяется соотношением l/λ , количеством трещин, а также величиной

базы измерения и достигает максимума в области квазианизотропии ($0,1 < l/\lambda < 1,0$). Здесь амплитудно-частотная характеристика среды имеет периодическую форму с минимумами при $l/\lambda = 2^m$ ($m = -3; -2; -1; 0$), обусловленными резонансным затуханием в условиях интерференции колебаний [22].

7. В переходной области ($0,1 < l/\lambda < 1,0$) среда со средней плотностью трещин проявляет наибольшую степень анизотропии по амплитудным и спектральным характеристикам [22].

3. Длина волны меньше неоднородности

3. 1. Хаотическое распределение трещиноватости. В случае крупномасштабных флуктуаций ($kl \gg 1$) рассеяние имеет резко направленный характер: основная часть энергии рассеяния сосредоточена в пределах малого телесного угла $\theta \sim 1/kl$ ($k = 2\pi/\lambda$, l – длина трещины), для высокочастотной части спектра трещина представляет собой крупномасштабную неоднородность. Эта часть спектра рассеивается в малом телесном угле [19].

3. 2. Ориентированное распределение трещиноватости. 1. Амплитуда продольной волны имеет максимальные значения при прохождении волны вдоль трещин и перпендикулярно к трещинам. 2. Минимальные значения амплитуды наблюдаются при углах, близких к 45° . При этих же углах наблюдаются максимальные значения частоты импульса, прошедшего через трещинную среду.

Эти результаты хорошо согласуются с теоретическими данными. Продольная волна мало ослабевает на вертикальной и горизонтальной трещине и значительно ослабевает на трещинах, ориентированных под углом 45° [19]. При $l/\lambda > 1$ индикатрисы скоростей приобретают ступенчатую форму за счет влияния отдельных трещин. Среда с низкой плотностью трещин при относительно слабой анизотропии по скорости и спектральным характеристикам может иметь значительную анизотропию по амплитудным параметрам [22].

Данные полевых наблюдений

В качестве иллюстрации результатов моделирования на рисунках представлены результаты направленного накопления сигнала, реализованного методом параметрической развертки отображений (ПРО) [11]. В методе ПРО, помимо зеркальной компоненты, накапливается рассеянная компонента. Накопление сигнала происходит вдоль поверхностей общих нормалей (ПОН), что позволяет осуществлять пространственно ориентированное накопление сигнала. На рис. 1 показаны результаты обработки по методу ПРО на известной структуре “Горелая”, Ханты-Мансийская площадь, Западная Сибирь. В центральной части профиля находится палеовулкан. На его кальдере расположена рифогенная структура, являющаяся резервуаром для месторождения нефти. Из сопоставления левого (а) и правого

(б) разрезов видно различие интенсивности спектров вдоль горизонтов баженовской свиты, особенно в начальной части профиля, что свидетельствует о наличии анизотропии среды, связанной с направлением падения трещиноватости в сторону увеличения пикетов на этом профиле. Это же направление преобладает в складчатом и кристаллическом фундаменте.

Трещиноватая среда является азимутально-частотным фильтром. Разрывные нарушения в силу своей природы являются рассеивающими телами [12]. Рассеянная компонента наиболее полно представлена на низкочастотной полосовой фильтрации (рис. 1в, г). Это объясняется тем, что при накоплении рассеянных волн происходит по огибающей цуга этих волн. На рис. 1в, г очень ярко проступает зависимость интенсивности от направления накопления рассеянных волн.

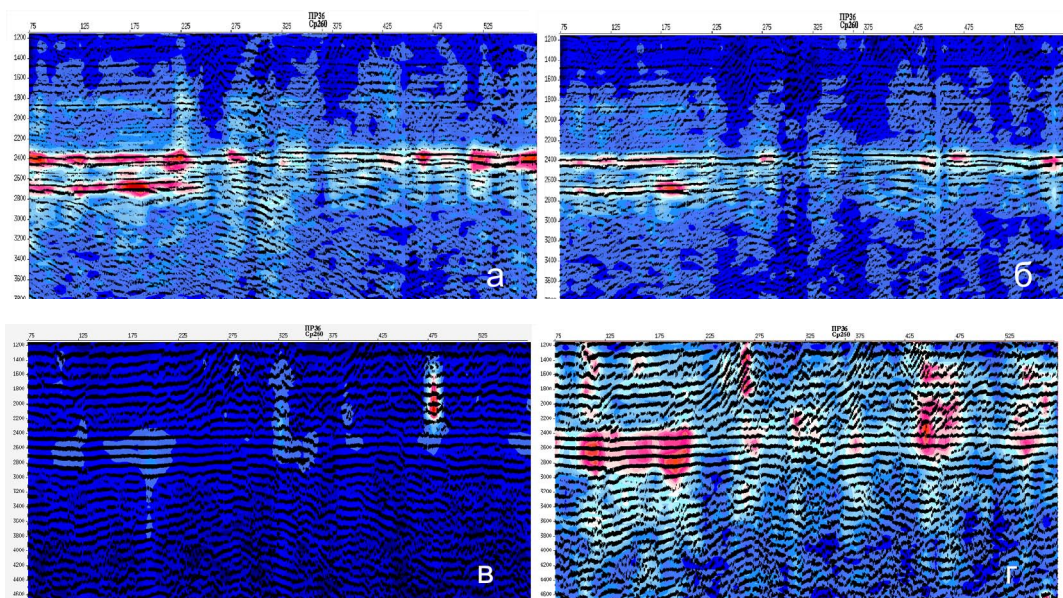


Рис. 1. Разрез энергетических спектров предельно эффективной скорости по профилю № 8. Манты-Мансийская площадь

Обработка по методу параметрической развертки отображений. Накопление по встречной системе наблюдений при различных значениях поверхностей общих нормалей (ПОН). С осреднением по зоне Френеля ($F=1,4$); а – отрицательные значения радиусов ПОН (-30, 300000); б – положительные значения радиусов ПОН (30, 300000), полосовая фильтрация 23, 30, 70, 80 Гц; в – положительные значения радиусов ПОН (30, 300000), полосовая фильтрация 3, 5, 7, 10 Гц; г – отрицательные значения радиусов ПОН (-30, 300000), полосовая фильтрация 3, 5, 7, 10 Гц (обработка автора, 1998 г.)

Другим важнейшим свойством области диффузионного рассеяния является захват трещиноватой средой упругой энергии при больших углах падения и высокой плотности трещин. Этот механизм проявляется в увеличении длительности волнового пакета (коды колебаний), аномальном увеличении длительности трасс, зависящей от количества рассеянной энергии. При увеличении длительности волнового пакета происходит перераспределение энергии в последующую фазу, что ведет к эффекту кажущегося понижения скорости. Это явление было использовано автором этой статьи для выделения границы кристаллического и складчатого фундаментов, зон разрывных нарушений на Восточно-Европейской платформе и в Западной Сибири при обработке данных по методу ПРО. Субгоризонтальные разрывные нарушения или, более корректно, горизонты инверсии упругих свойств, для регионального масштаба получившие название волноводов при наблюдениях по методу МОВ-МОГТ, достаточно часто характеризуются неуверенной корреляцией, что объясняется падением лучей по траектории, близкой к нормали, и существенной шероховатостью таких границ. К границам с неуверенной корреляцией также относится граница между осадочным чехлом и кристаллическим фундаментом.

При накоплении, помимо зеркальной компоненты рассеянной компоненты, для таких границ, как уже отмечалось выше, происходит перераспределение упругой энергии в последующую фазу, что обуславливает кажущиеся понижение скорости (рис. 2а, б). Из рисунков видно, что добавка рассеянной компоненты позволяет получить гораздо более объективное представление о строении волноводов. Распределения интервальной скорости после высокочастотной и низкочастотной фильтрации исходных сейсмограмм значительно различаются.

Выводы

Результаты физического моделирования являются одним из основных элементов описания свойств априорной сейсмической модели среды при постановке сейсмических исследований.

При обработке и интерпретации физическое моделирование служит оценкой всесторонности и корректности в решении обратной задачи.

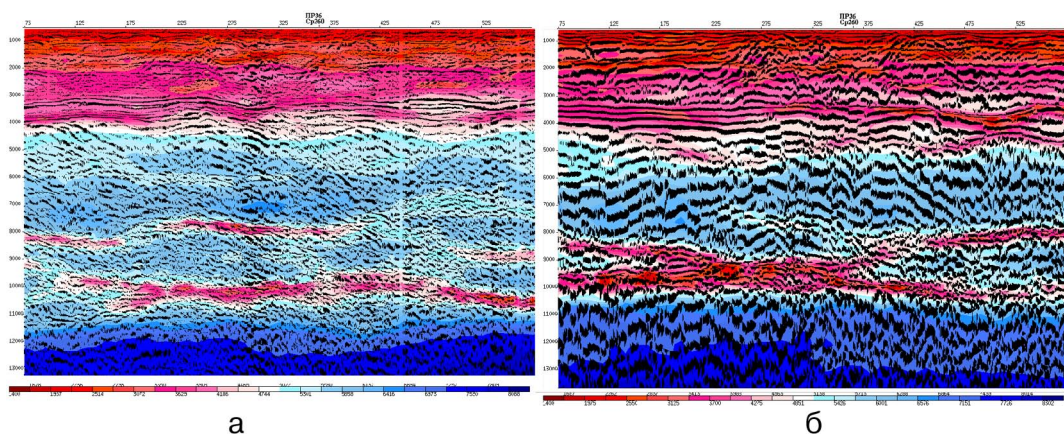


Рис. 2. Разрез интервальных скоростей по профилю № 8. Манти-Мансийская площадь
 Обработка по методу параметрической развертки отображений. Накопление по встречной системе наблюдений. Осреднение по зоне Френеля ($F=1,4$). Отрицательные значения радиусов ПОН (-30, 300000), а – полосовая фильтрация 23, 30, 70, 80 Гц; б – полосовая фильтрация 3, 5, 7, 10 Гц

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бугаевский А. Г.* Два метода оценки эффективных модулей упругости трещиноватых сред//Физика Земли. № 2. 1987. С. 3–7.
2. *Виноградов С. Д., Троицкий П. А., Соловьева М. С.* Изучение распространения упругих волн в среде с ориентированной трещиноватостью//Физика Земли. № 5. 1992. С. 14–34.
3. *Виноградов С. Д., Троицкий П. А., Соловьева М. С.* Влияние трещиноватости и напряжений в среде на параметры распространяющихся упругих волн//Физика Земли. № 4. 1989. С. 42–56.
4. *Виноградов С. Д., Соловьева М. С.* Параметры упругих волн, распространяющихся в нагруженной трещиноватой среде//Физика Земли. № 4. 1999. С. 68–74.
5. *Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухорукова А. П.* Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.
6. *Гельчинский Б. Я., Караев Н. А., Бейлькин Г. Я., Коган Л. Д.* Теоретико-модельные исследования полей, образующихся на структурах разрыва/Сейсмические волновые поля в зонах разломов/Под ред. Николаева А. В. М.: Наука, 1978. С. 60–78.
7. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. В 2-х томах. М.: Мир, 1981. 598 с.
8. *Караев Н. А.* Волновые поля, формируемые на гетерогенных зонах//Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Вып. XXII. 1982. С. 110–131.
9. *Караев Н. А., Скрипова В. Ф., Суматохина И. И.* Модели гетерогенных блоков и формируемые ими волновые поля//Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Вып. XXIII. 1983. С. 194–204.
10. *Клем-Мусатов К. Д.* Теория краевых волн и ее применение в сейсмике. Новосибирск: Наука, 1980. 296 с.
11. *Кондрашков В. В., Анискович Е. М., Богданов А. Н.* Метод параметрической развертки отображений: от концепции до обрабатывающей системы//Геофизика. № 4. 1998. С. 21–29.
12. *Кузин А. М.* Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений//Геофизика. № 5. 1999. С. 3–15.
13. *Невский М. В.* Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 143 с.
14. *Николаев А. В.* Сейсмика неоднородных и мутных сред. М.: Наука, 1973. 174 с.
15. *Петкевич Г. И.* Информативность акустических характеристик неоднородных геологических сред. Киев: Наукова думка, 1976. 214 с.
16. *Рац М. В.* Неоднородности горных пород и их физические свойства. М.: Недра, 1968. 107 с.
17. *Ризниченко Ю. В.* Сейсморазведка слоистых сред. М.: Недра, 1985. 184 с.
18. *Силаева О. И., Замахеев А. М.* Пространственно-временные изменения скоростей и периодов ультразвуковых волн около Карасуйского надвига//Прогноз землетрясений. Душанбе – Москва: Дониш, 1983–1984, № 4. С. 339–350.
19. *Стрижков С. А.* Исследование характера частотных изменений Р-волны на моделях случайно-трещиноватых сред//Физика Земли. № 5. 1981. С. 92–96.
20. *Талонов А. В., Тулинов Б. М.* Упругие волны в среде, ослабленной трещинами//Физика Земли. № 4. 1989. С. 33–41.
21. *Урунов А. К., Левин А. Н.* Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. М.: Недра, 1985. 288 с.
22. *Урунов А. К., Трушников Э. Б.* Двухмерное ультразвуковое моделирование распространения продольных волн в среде с одной системой трещин//Физика Земли. № 11. 1992. С. 29–53.
23. *Шамина О. Г., Локайчик Т.* Распространение упругих волн в физических моделях случайно-неоднородных сред//Физика Земли. № 4. 1992. С. 78–86.
24. *Шамина О. Г., Паленов А. М., Ткаченко В. С., Понятовская В. И.* Амплитудно-частотные характеристики моделей сред с развивающейся трещиноватостью//Физика Земли. № 3. 1994. С. 56–62.
25. *Frankel A.* A review of numerical experiments on Seismic wave scattering//PAGEOPH. 1969. V. 131. № 4. P. 639–685.
26. *Knopoff L.* Scattering of compressional waves by spherical obstacles//Geophysics. 1959. V. XXIV. № 1. P. 30–39.
27. *Teisseyre R., Dresen L., Kozak J., Waniek L.* Physical properties of micromorphic medium: theory and experiment Acta Geophys. Polonica. 1985. V. XXXIII. № 4. P. 341–356.

Рукопис отримано 09.10.2013.

У статті наведено зведені результати фізичного моделювання розсіяних хвиль з різних робіт, і що вельми важливо, виконаних за подібною методикою і на схожій експериментальній (технічній) базі. На декількох прикладах інтерпретації даних багатократних сейсмічних спостережень показано, що фізичне моделювання дає можливість коректно проводити обґрунтування особливостей хвильової картини.

Ключові слова: *фізичне моделювання, тріщинно-пористе середовище, розсіяні хвилі, анізотропія.*

This paper summarizes results on analog modeling of scattered waves from various studies conducted with similar methods and resembling experimental (technical) basis. Using several examples of interpretation of repeated seismic observations, we showed that analog modeling enabled consistent explanation of the wave pattern characteristics.

Keywords: *physical modeling, scattered waves, anisotropy, fractured-porous medium.*