

**О ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ**

Часть 1

А.М. Кузин

Институт проблем нефти и газа РАН

e-mail: amkouzin@ya.ru

Устойчивой тенденцией поисково-разведочных работ является развитие глубинных и детальных исследований. Наиболее наглядно эта тенденция проявляется в региональных исследованиях МОГТ. В последние 10–15 лет диапазон исследуемых по данному методу глубин существенно расширился, и сегодня он охватывает всю земную кору. Отражающие границы в консолидированной коре характеризуются значительными рассеивающими свойствами, одной из причин этого является увеличение отношения длины волны к размерам неоднородности. При повышении детальности исследований (возрастание высокочастотной части спектра) вклад рассеянной компоненты в суммарное поле отраженных волн также возрастает.

К основным параметрам реальной среды относятся: плотность пор и трещин, раскрытость трещин, проницаемость, флюидонасыщенность, фазовое состояние наполнителя, напряженное состояние. Эти параметры определяют нелинейность сейсмических свойств геосреды. Наиболее ярким проявлением нелинейности геосреды служат рассеянные волны. Разрывные нарушения являются одними из самых распространенных элементов тектонического строения. Рассеянные волны вносят значительный вклад в результирующее поле от разрывных нарушений. Теоретически в [Клем-Мусатов, 1980] была обоснована возможность выделения в интерференционном поле дифрагированных волн малоамплитудных разрывных нарушений путем частотной фильтрации. В статье предпринята попытка систематизации рассеивающих свойств упругих волн по данным физического моделирования.

В общем случае трещиноватая среда является азимутально-частотным фильтром для сравнительно узкополосного сигнала. В зависимости от соотношения размера неоднородности к длине волны (l/λ), 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 [Бугаевский, 1987; Талонов, Тулинов, 1989; Урупов, Трушников, 1992].

I. Длина волны значительно больше неоднородности

I.1. Хаотическое распределение трещиноватости. Экспериментальные исследования подтвердили, что мелкомасштабные неоднородности являются причиной изотропного рассеяния. Под действием нагрузки анизотропия в среде проявляется как для ориентированной трещиноватости, так и для случайно ориентированных трещин [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1989].

I.2. Ориентированное распределение трещиноватости. В модели с упорядоченной структурой («микроморфная» модель трещиноватой 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 [Teisseyre et al., 1985]. 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 [Виноградова, Руденко, Сухорукова, 1990] или квазидисперсией [Невский, 1974; Ризниченко, 1985; Урупов, Левин, 1985]. Эксперименты по изучению дисперсионных эффектов по фазовой характеристике среды показали связь дисперсии скорости с характером фильтрации сигналов в среде, но четкой зависимости получено не было [Урупов, Трушников, 1992]. Для модели среды с параллельными трещинами установлена различная величина тензочувствительности (производная по давлению) для кинематических и динамических параметров [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1992]. 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 [Виноградов, Соловьева, 1999].

Для ориентированной трещиноватости в [Урупов, Трушников, 1992] предложена и рассмотрена следующая классификация среды: 1) при $l/\lambda > 1$ среда упорядоченна, неоднородна и анизотропна; 2) для $l/\lambda \ll 1$ среда эффективно-однородна и анизотропна; 3) при $l/\lambda \sim 1$ переходная область свойств среды.

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 и анизотропной средой и является фильтром низких частот. Среда с высокой плотностью трещин, будучи эффективно-однородной и анизотропной, проявляет значительную анизотропию по скорости; для амплитудных и спектральных характеристик может быть близка к изотропной среде, особенно при $l/\lambda \ll 0,1$.

II. Длина волны приблизительно равна размеру неоднородности

Из теории известно [Кнорфф, 1959; Frankel, 1969; Николаев, 1973; Исимару, 1981], 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 [Стрижков, 1981].

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 [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1992]. Первая область (область однократного рассеяния) характеризуется нулевым углом (относительно трещин) и всеми вариациями плотности трещин, а также минимальной плотностью трещин и всеми значениями углов. В этой области наблюдаются 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) характеризуется высокой плотностью трещин, большими значениями углов и 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 для гетерогенных сред описан в [Гельчинский и др., 1978; Караев, 1982; Караев, Скрипова, Суматохина, 1983]. Под гетерогенностью понимается неравномерность распределения вещества и физических свойств пород в виде неоднородных включений всех масштабов, от микро- до макронеоднородностей [Рац, 1968; Петкевич, 1976]. Временные разрезы, полученные из моделей гетерогенных блоков с ориентированным и хаотическим распределением локальных элементов, по волновой картине оказались схожими. По результатам моделирования волновых полей над гетерогенными зонами (разломы, надвиги, системы складок и т.п.) были сформулированы следующие положения [Гельчинский и др., 1978; Караев, 1982; Караев, Скрипова, Суматохина, 1983]. Класс гетерогенных моделей является более общим, по сравнению с регулярными слоисто-блоковыми моделями. Центральное место в нем занимают гетерогенные системы со среднемасштабными (относительно длины волны) включениями. Основным типом волн, формируемых гетерогенными системами, являются рассеянные волны, которые содержат фрагменты отражений, близкие к зеркально отраженному полю.

Квазиупорядоченные гетерогенные зоны. Суммарное поле, образованное ими, представлено одним или несколькими волновыми пакетами, характеризующимися 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. Образованное ими волновое поле носит квазирегулярный характер, для него справедлив принцип локальности. По отношению к гетерогенной зоне поле в среднем симметрично относительно минимума группового годографа. Установлены 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, а групповые годографы являются огибающими по отношению к системе фазовых годографов.

II.1. Хаотическое распределение трещиноватости

В среде с различным распределением плотности трещин при соотношении $l/\lambda = 2$ были установлены следующие эффекты [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1989]:

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 [Силаева, Замахеев, 1983–1984].

5. Для моделей (включения шаровой формы) случайно-неоднородной среды с низкой плотностью включений при многократном рассеянии влияние на спектральный состав P - и S -волн (для P -волн $0,80 < d/\lambda < 1,63$; для S -волн $0,21 < d/\lambda < 0,41$) числа и

размеров рассеивателей приводит к следующим эффектам [Шамина, Локайчик, 1992; Шамина и др., 1994]:

5.1. Максимальные значения в амплитудных спектрах амплитуд продольных A_p и поперечных A_s волн убывают с увеличением N (число включений в объеме модели) по закону, близкому к линейному, в координатах N , $\ln A$.

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

5.3. С увеличением d/λ значения A_p и A_s падают; скорость падения при больших значениях d/λ выше, чем при меньших.

5.4. При увеличении базы прозвучивания рост A_p и A_s 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 P - и S -волн.

II.2. Ориентированное распределение трещиноватости

1. Установлена корреляция между максимумами в спектральной характеристике и периодом ориентированных трещин [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1992].

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

3. Индикатрисы скоростей с уменьшением l/λ и увеличением базы измерений постепенно сглаживаются [Урупов, Трушников, 1992].

4. Индикатрисы амплитуд показывают резкое уменьшение амплитуды с увеличением угла падения к плоскости трещин [Урупов, Трушников, 1992].

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 [Урупов, Трушников, 1992].

6. Анизотропия спектральных характеристик определяется соотношением l/λ , количеством трещин, а также величиной базы измерения и достигает максимума в области

квазианизотропии ($0,1 < 1/\lambda < 1,0$). Здесь амплитудно-частотная характеристика среды имеет периодическую форму с минимумами при $1/\lambda = 2^m$ ($m = -3; -2; -1; 0$), обусловленными резонансным затуханием в условиях интерференции колебаний [Урупов, Трушников, 1992].

7. В переходной области ($0,1 < 1/\lambda < 1,0$) среда со средней плотностью трещин проявляет наибольшую степень анизотропии по амплитудным и спектральным характеристикам [Урупов, Трушников, 1992].

III. Длина волны меньше неоднородности

III.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 [Стрижков, 1981].

III.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 трещинах и значительно – на трещинах, ориентированных под углом 45° [Стрижков, 1981].

При $1/\lambda > 1$ 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 [Стрижков, 1981].

Согласованность результатов физического моделирования и данных полевых сейсмических наблюдений проиллюстрирована на рис. 1 и 2, см. приложение. На них представлены сейсмические разрезы, полученные при направленном накоплении сигнала, реализованного в методе параметрической развертки отображений (ПРО) [Кондрашков, Анискович, Богданов, 1998]. В этом методе помимо зеркальной компоненты накапливается рассеянная компонента. Накопление сигнала происходит

вдоль поверхностей общих нормалей (ПОН), что позволяет осуществлять пространственно ориентированное накапливание сигнала.

На рис. 1 представлены результаты обработки по методу ПРО на известной структуре Горелая (Ханты-Мансийская площадь, Западная Сибирь) [Кузин, Ершов, 1999]. 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, связанной с направлением падения трещиноватости в сторону увеличения пикетов на этом профиле. Это же направление преобладает в складчатом и кристаллическом фундаменте.

Трещиноватая среда, как уже отмечалось выше, представляет собой азимутально-частотный фильтр. Разрывные нарушения в сил своей природы являются рассеивающими телами [Кузин, 1999]. Рассеянная компонента наиболее полно представлена на низкочастотной фильтрации (рис. 1, в, г). Это объясняется тем, что накапливание рассеянных волн происходит по огибающей цуга этих волн. На рис. 1, в, г ярко проступает зависимость интенсивности от направления накапливания рассеянных волн.

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 настоящей 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 исследований, получили название волноводов. Они достаточно часто характеризуются неуверенной корреляцией, что объясняется падением лучей по траектории, близкой к нормали, при существенной шероховатости таких границ.

При накапливании сигнала, помимо зеркальной компоненты, накапливается рассеянная компонента волнового поля. Для шероховатых границ, как уже отмечалось выше, происходит перераспределение упругой энергии в последующую фазу, что обуславливает кажущееся понижение скорости (см. рис. 2). Из рис. 1 и 2 видно, что добавка рассеянной компоненты в суммарное поле позволяет получить гораздо более объективное представление о строении волноводов. Распределение интервальной скорости после высокочастотной и низкочастотной фильтрации исходных сейсмограмм значительно различается, что позволяет изучать особенности внутреннего строения зон разрывных нарушений.

К границам с неуверенной корреляцией также относится граница между осадочным чехлом и кристаллическим фундаментом. Картирование этой границы по рассеянным волнам может представлять интерес для поисков месторождений углеводородов.

Заключение

Результаты физического моделирования должны служить одним из основных элементов описания свойств априорной сейсмической модели среды при сейсмических исследованиях.

Сопоставление данных полевых наблюдений и лабораторного моделирования является важным фактором при обосновании геологической природы отражающих границ.

Современный граф обработки сейсмических данных, как отдельную задачу, должен включать обработку рассеянной компоненты волнового поля.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

Бугаевский А.Г. Два метода оценки эффективных модулей упругости трещиноватых сред // Физика Земли. 1987. № 2. С. 3–7.

Виноградов С.Д., Соловьева М.С. Параметры упругих волн, распространяющихся в нагруженной трещиноватой среде // Физика Земли. 1999. № 4. С. 68–74.

Виноградов С.Д., Троцкий П.А., Соловьева М.С. Влияние трещиноватости и напряжений в среде на параметры распространяющихся упругих волн // Физика Земли. 1989. № 4. С. 42–56.

Виноградов С.Д., Троцкий П.А., Соловьева М.С. Изучение распространения упругих волн в среде с ориентированной трещиноватостью // Физика Земли. 1992. № 5. С. 14–34.

Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухорукова А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.

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. А.В. Николаева. М., 1978. С. 60–78.

Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: в 2 т. М.: Мир, 1981. 598 с.

Караев Н.А. Волновые поля, формируемые на гетерогенных зонах // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., 1982. Вып. 22. С. 110–131.

Караев Н.А., Скрипова В.Ф., Суматохина И.И. Модели гетерогенных блоков и формируемые ими волновые поля // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., 1983. Вып. 23. С. 194–204.

Клем-Мусатов К.Д. Теория краевых волн и ее применение в сейсмике. Новосибирск: Наука, 1980. 296 с.

Кондрашков В.В., Анискович Е.М., Богданов А.Н. Метод параметрической развертки отображений: от концепции до обрабатывающей системы // Геофизика. 1998. № 4. С. 21–29.

Кузин А.М. Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С. 3–15.

Кузин А.М., Ершов П.Н. Новые возможности метода ПРО в изучении палеозойского фундамента Западной Сибири // Геофизика. 1999. № 1. С. 24–27.

Невский М.В. Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 143 с.

Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. М.: Наука, 1973. 174 с.

Петкевич Г.И. Информативность акустических характеристик неоднородных геологических сред. Киев: Наук. думка, 1976. 214 с.

Рац М.В. Неоднородности горных пород и их физические свойства. М.: Недра, 1968. 107 с.

Ризниченко Ю.В. Сейсморазведка слоистых сред. М.: Недра, 1985. 184 с.

Силаева О.И., Замахеев А.М. Пространственно-временные изменения скоростей и периодов ультразвуковых волн около Карасуйского надвига // Прогноз землетрясений, Душанбе; Москва, 1983–1984. № 4. С. 339–350.

Стрижков С.А. Исследование характера частотных изменений *P*-волны на моделях случайно трещиноватых сред // Физика Земли. 1981. № 5. С. 92–96.

Талонов А.В., Тулинов Б.М. Упругие волны в среде, ослабленной трещинами // Физика Земли. 1989. № 4. С. 33–41.

Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. М.: Недра, 1985. 288 с.

Урупов А.К., Трушников Э.Б. Двухмерное ультразвуковое моделирование распространения продольных волн в среде с одной системой трещин // Физика Земли. 1992. № 11. С. 29–53.

Шамина О.Г., Локайчик Т. Распространение упругих волн в физических моделях случайно-неоднородных сред // Физика Земли. 1992. № 4. С. 78–86.

Шамина О.Г., Паленов А.М., Ткаченко В.С., Понятовская В.И. Амплитудно-частотные характеристики моделей сред с развивающейся трещиноватостью // Физика Земли. 1994. № 3. С. 56–62.

Frankel A. A review of numerical experiments on seismic wave scattering // PAGEOPH. 1969. Vol. 131, No. 4. P. 639–685.

Knopoff L. Scattering of compressional waves by spherical obstacles // Geophysics. 1959. Vol. 24, No. 1. P. 30–39.

Teisseyre R., Dresen L., Kozak J., Waniek L. Physical properties of micromorphic medium: theory and experiment // Acta Geophys. Polonica. 1985. Vol. 33, No. 4. P. 341–356.

ПРИЛОЖЕНИЕ

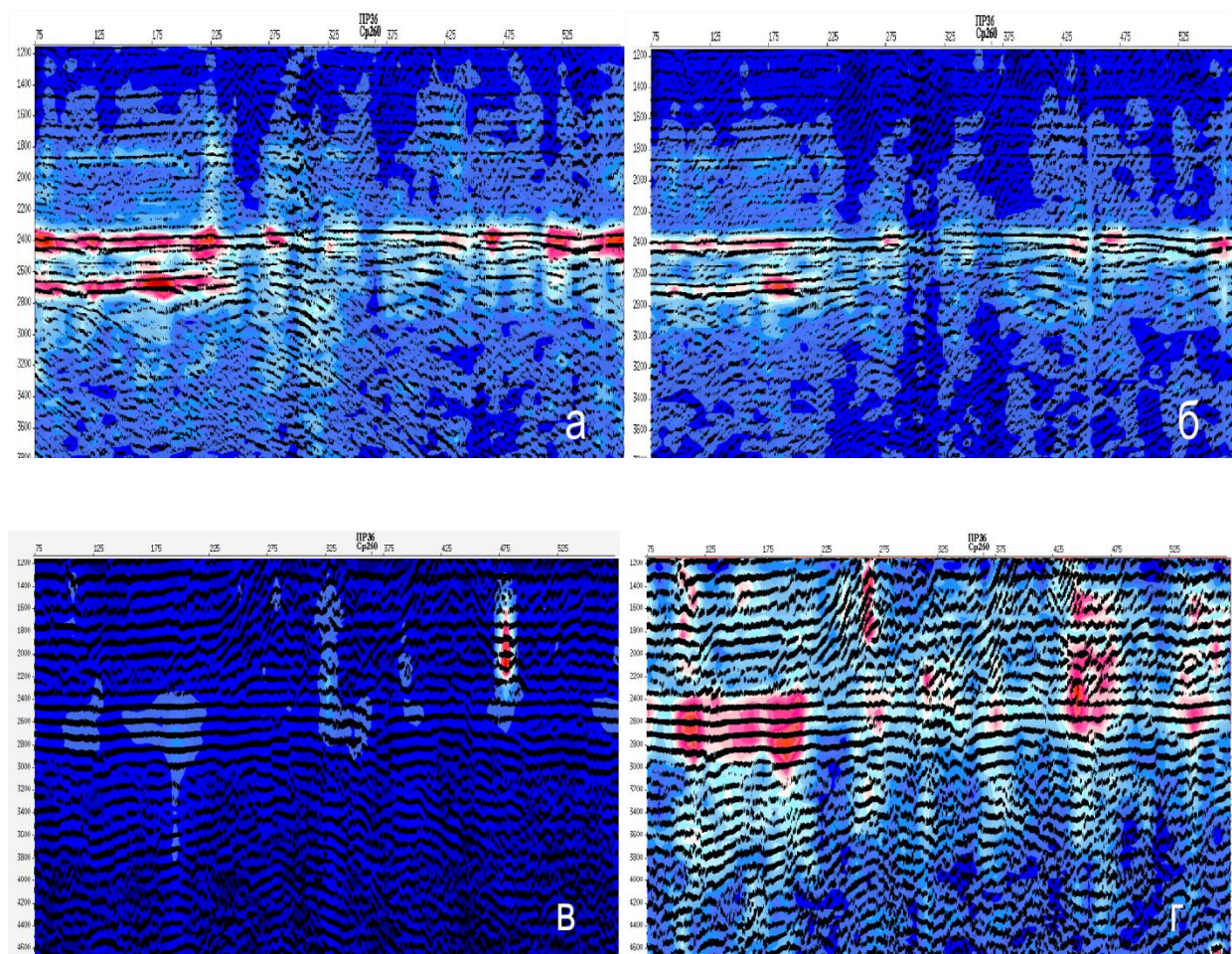


Рис. 1.

Разрез энергетических спектров предельно-эффективной скорости по профилю № 8 (Ханты-Мансийская площадь). Обработка по методу параметрической развертки отображений. Накапливание 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); 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.

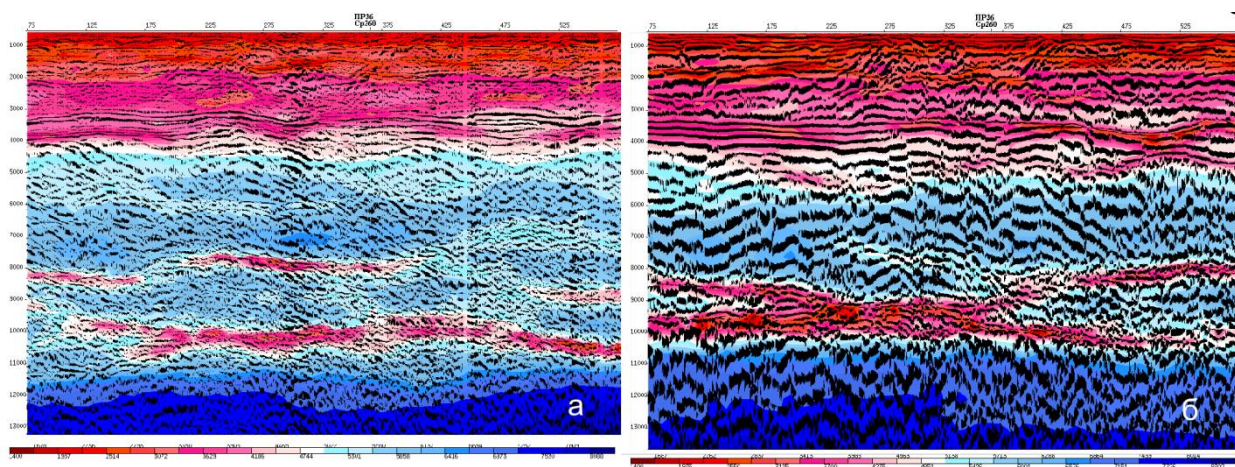


Рис. 2.

Разрез интервальных скоростей по профилю № 8 (Ханты-Мансийская площадь). Обработка по методу параметрической развертки отображений. Накапливание 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