



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАРТИРОВАНИЯ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ В БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБМЕННЫХ РАССЕЯННЫХ ВОЛН

В.Б. Левянт¹, И.Е. Квасов², И.Б. Петров²

¹ОАО “Центральная геофизическая экспедиция”,
123298, Москва, ул. Народного Ополчения, д. 38, корп. 3, Россия, e-mail: vbleviant@gmail.com

²Московский физико-технический институт (университет),
141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия, e-mail: i.kvasov@gmail.com, petrov@mipt.ru

В работе с использованием сеточно-характеристического метода численного моделирования рассчитаны волновые поля откликов от трех типовых моделей баженовской свиты, содержащих трещиноватые пласты малой мощности, заполненные флюидом. Показано, что изначально слабая обменная рассеянная волна, содержащая основную информацию о трещиноватых зонах, может быть существенно усилена в результате применения центральных систем наблюдения МОГТ с 3С-регистрацией и специальных процедур обработки. Получены первые результаты, подтверждающие потенциальную возможность выделения на суммарном временном разрезе в целевом интервале трещиноватых зон в баженовской свите по аномалии обменной рассеянной волны.

Численное моделирование, баженовская свита, обменные рассеянные волны, трещиноватые пласты, 3С-регистрация

INVESTIGATION OF POSSIBILITIES FOR MAPPING FRACTURED ZONES IN THE BAZHENOV FORMATION USING SCATTERED CONVERTED WAVES

V.B. Leviant¹, I.E. Kvasov², I.B. Petrov²

¹Central Geophysical Expedition JSC,
Narodnogo Opolcheniya str, 38, Bldg. 3, Moscow, 123298, Russia, e-mail: vbleviant@gmail.com

²Moscow Institute of Physics and Technology – MFTI,
Institutsky per., 9, Moscow oblast, Dolgoprudny, 141700, Russia, e-mail: i.kvasov@gmail.com, petrov@mipt.ru

Numerical modeling, based on grid-characteristic method, is used to compute wavefields of seismic responses from three typical Bazhenov Formation models containing thin fluid-filled beds. It is shown, that the originally weak scattered converted waves, containing principal information on fractured zones, can substantially be enhanced by employing 3C split-spreads to record CMP reflections, and by using special processing procedures. The initial preliminary results have been obtained that confirm potential possibility of bringing out Bazhenov Formation fractured zones within a stacked time section target interval from scattered converted wave anomalies.

Numerical modeling, Bazhenov Formation, scattered converted waves, fractured beds, 3C-recording

ВВЕДЕНИЕ

Значение использования нефтяного потенциала баженовской свиты после получения промышленных притоков на целом ряде разведочных площадей обширного Западносибирского бассейна (1 млн км²) трудно переоценить. Однако эффективной методики поиска и разведки залежей нефти в отложениях этой свиты, не связанных со структурным фактором, до настоящего времени нет. В последнее десятилетие усилия сейсморазведчиков были направлены на разработку методов прогнозирования продуктивности по динамическим характеристикам продольных отраженных волн, основанных на поиске их статистических связей с показателями нефтенасыщенности по имеющимся скважинам. Однако статистические зависимости, обеспечивающие удовлетворительные результаты в районе настройки, как правило, не работают на новых площадях.

В последние 5–7 лет на ряде объектов были получены данные детальных исследований, охарактеризовавших внутреннюю структуру и особенности лито-

логического и петрофизического состава баженовской свиты в скважинах, давших значительные притоки нефти [Зубов, Пормейстер, 2005; Славкин и др., 2007]. Почти во всех случаях приточным интервалам соответствовали или слой, или пачки тонких (1–2 м) прослоев карбонатных или кремнистых пород общей мощностью от 3 до 8 м, пронизанных субвертикальными трещинами.

В площадных съемках последних лет [Гогоненков, Некрасова, 2012; Кунин и др., 2013; Ревенко и др., 2013] эту детальную скважинную информацию (FMI, X-МАК) использовали для численного моделирования сигналов от трещиноватых пластов в точках скважин и на их основе, в комплексе с другими данными, прогнозировали зоны трещиноватости в баженовской свите. Удовлетворительный уровень прогноза в этих работах обеспечивался в основном на исследуемой площадке. Перенос выявленных закономерностей на новые объекты чреват в большинстве случаев малодоверным прогнозом.

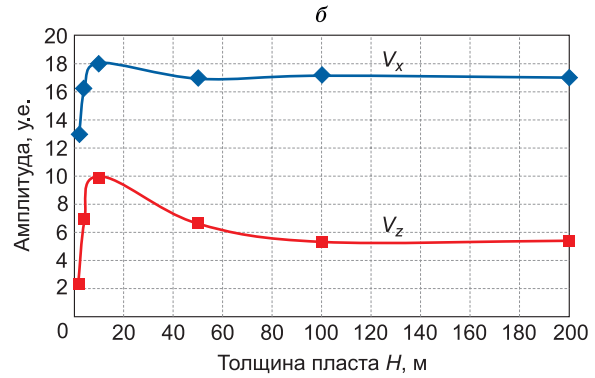
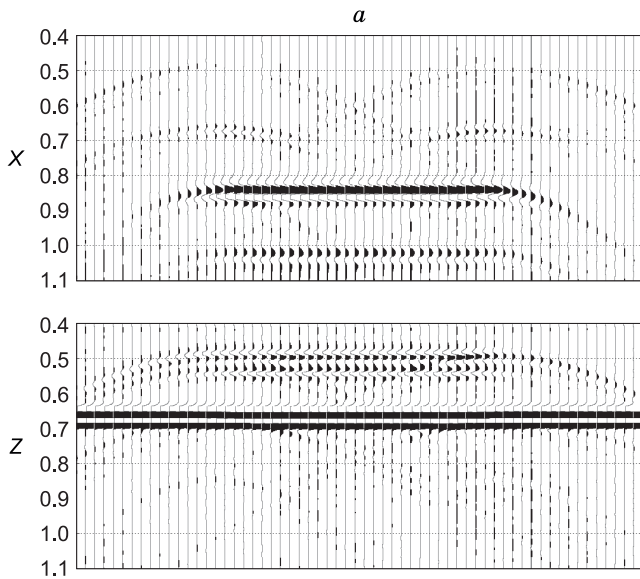


Рис. 1. Влияние толщины (H) трещиноватого пласта на характер и интенсивность рассеянных фронтов отклика от пластовой зоны мезотрещин.

a – сейсмограммы записи X - и Z -компонент при $H = 10$ м; b – графики зависимостей $V_x = F(H)$, $V_z = F(H)$.

В связи с вышеизложенным представлялось целесообразным исследовать возможность принципиально нового подхода, основанного на прямом обнаружении трещиноватых зон в маломощных карбонизированных или кремнистых пластах баженовской свиты. Основанием для такого подхода являются результаты исследований численным моделированием откликов от зон мезотрещин, изложенные в работе [Квасов и др., 2013]. На рис. 1 приведен фрагмент из этой работы, иллюстрирующий зависимость амплитуд обменной (V_x) и продольной (V_z) рассеянных волн (фронтов) отклика от толщины (H) пластовой зоны мезотрещин (характеристика термина дается в разделе 2).

Рис. 1 показывает практически постоянный уровень интенсивности фронта обменных рассеянных волн. (V_x) для H от 5 до 200 м (для $H = 2$ м ослабление только 20 %), что определяет возможность регистрации на горизонтальной X -компоненте прямого обменного отклика от трещиноватых пластов малой мощности.

Задачей данной работы было детальное исследование возможности прямого обнаружения трещиноватых зон в таких пластах применительно к конкретным условиям баженовской свиты.

1. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для изучения характера распространения упругих волн, вызванных прохождением падающего (продольного) волнового фронта через трещиноватую среду, был использован гибридный сеточно-характеристический метод на треугольных неравномерных сетках, разработанный и развиваемый на кафедре информатики Московского физико-технического института под руководством проф. И.Б. Петрова.

Использовалась модель идеального изотропного линейно-упругого материала. Замкнутая система дифференциальных уравнений с частными производными описывает состояние элементарного объема упругого материала в приближении малых деформаций следующими выражениями [Кондауратов, Фортов, 2002]:

$$\rho \frac{\partial V_x}{\partial t} = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y},$$

$$\rho \frac{\partial V_y}{\partial t} = \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y},$$

$$\frac{\partial T_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial V_y}{\partial y},$$

$$\frac{\partial T_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial V_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_y}{\partial y},$$

$$\frac{\partial T_{xy}}{\partial t} = \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} + \mu \frac{\partial V_x}{\partial y},$$

где ρ – средняя плотность среды, λ , μ – параметры Ламе, V_x и V_y – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости, T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} – напряжения в среде.

Рассмотрены условия контакта массивной породы с заполненными газом или жидкостью трещинами.

Постановка граничных условий на поверхности раздела породы и трещины в явном виде, что позволяет: а) ослабить ограничения на положение и ориентацию неоднородностей; б) учитывать неоднородности с практически нулевым объемом, но конечной площадью поверхности (трещины); в) повысить точность расчета микронеоднородностей с размерами, сопоставимыми с одной ячейкой сетки.

Использование неструктурированной треугольной разностной сетки, позволяющей описать любую форму неоднородностей (полостей) внутри массивной породы: и каверн, и плоских трещин.

Решения построены на основе сеточно-характеристического метода, относящегося к схемам типа Куранта–Изаксона–Риса для нерегулярных сеток. Поле восстанавливалось не линейной интерполяцией в каждом треугольнике, а по значениям в узлах, как непрерывная кусочно-квадратичная функция. Это обеспечивает численному методу свойство монотонности и позволяет избежать нефизических осцилляций решения. Подробное его изложение приведено в работах [Петров, Холодов, 1984; Магомедов, Холодов, 1988]. Предложенная методика моделирования оригинальна. Она обеспечивает высокоточный расчет волновых полей в произвольно заданных случайно неоднородных средах.

2. МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Структура строения свиты, базирующаяся на достаточно полной скважинной информации, полученной при 100 % отборе керна и достаточно полном комплексе ГИС в скважинах, давших промышленные притоки (Салымский, Назымский, Устькутский и другие районы), имеет общие черты. По данным, приведенным в выше упомянутых работах, в толще бажени- тов – нефтематеринской породе, присутствуют или слой трещиноватых карбонатов, или пачка прослоев из жестких карбонатизированных пород, или кремни- евых радиоляритов. При общей мощности слоя или пачки жестких прослоев от 3 до 10 м толщина прослоя колеблется в пределах 0.5–2 м. Соответственно трещи- ны, пронизывающие жесткие прослои и слои, относят- ся к категории мезотрещин, согласно общепринятой классификации [Козлов, 2006]. Мезотрещины характе- ризуются высотой, измеряемой первыми метрами, тол- щинной (раскрытостью) – десятками долями миллиме- тра и расстояниями между ними – в несколько метров.

Акустические характеристики бажени- тов имеют следующие значения:

- а) скорость продольных волн $V_p = 2400\text{--}2600$ м/с;
- б) скорость поперечных волн $V_s = 1100\text{--}1200$ м/с;
- в) объемная плотность $\rho = 2200\text{--}2300$ кг/м.

Вмещающие породы соответственно имеют:

- а) $V_p = 3400\text{--}3700$ м/с; б) $V_s = 1600\text{--}1700$ м/с; в) $\rho = 2600\text{--}2700$ кг/м.

Надежные измерения аналогичных физических характеристик жестких карбонатных и радиоляриевых слоев и прослоев отсутствуют. В большинстве упоми- навшихся работ при проектировании внутренней струк- туры свиты эти характеристики принимаются равными или на 10 % большими параметров вмещающей среды.

Исходя из приведенной информации сформиро- ваны три варианта моделей внутреннего строения ба- женовской свиты, мощностью 30 м каждая, зависящие от структуры жестких трещиноватых слоев и прослоев (рис. 2).

1. Один слой карбонатных или карбонатизирован- ных трещиноватых пород мощностью 5 м в середине свиты, по аналогии с разрезами, приведенными в ра- боте [Усманов и др., 2006].

2. Пачка из четырех полуметровых радиоля- ритовых или карбонатизированных прослоев с субвер- тикальной трещиноватостью, расположенных в сере- дине свиты, разделенных метровыми слоями бажени- тов, согласно типам разрезов, приведенным в работе [Ревенко и др., 2013].

3. Жесткие карбонатные трещиноватые двухме- тровые прослои, равномерно распределенные по всей 32-метровой толще баженовской свиты, согласно свод- ному литологическому разрезу баженовской свиты для Салымского месторождения, приведенного в работе [Гогоненков, Некрасова, 2012].

В табл. 1–3 приведены послойные параметры ско- ростей и плотности для каждой из вышеназванных моделей.

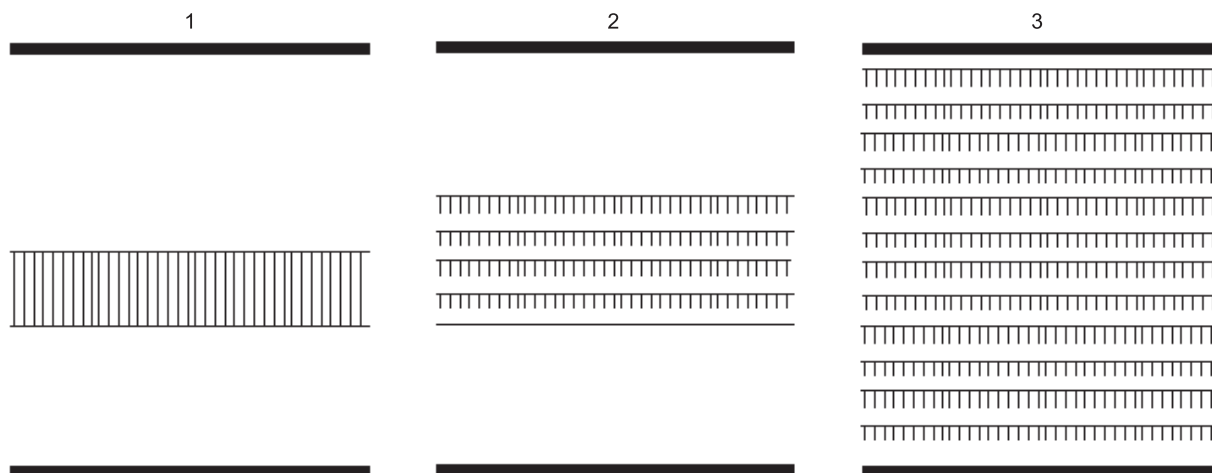


Рис. 2. Структура трещиноватости трех типовых моделей баженовской свиты (1–3 – номера моделей).

Таблица 1

Параметры модели 1 баженовской свиты

Номер пласта	Мощ- ность, м	ρ , кг/м ³	V_p , м/с	V_s , м/с	Наличие трещин
1	1500	2500	3000	1400	нет
2	1500	2600	3500	1600	нет
3	15	2300	2400	1100	нет
4	5	2700	3800	1700	есть
5	10	2300	2400	1100	нет
6	470	2600	3500	1600	нет

Таблица 2

Параметры модели 2 баженовской свиты

Номер пласта	Мощ- ность, м	ρ , кг/м ³	V_p , м/с	V_s , м/с	Наличие трещин
1	1500	2500	3000	1400	нет
2	1500	2600	3500	1600	нет
3	10	2300	2400	1100	нет
4*	1.5/1.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
4**	1.5/1.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
4***	2.0/1.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
4****	2.0/1.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
5	10	2300	2400	1100	нет
6	470	2600	3500	1600	нет

Таблица 3

Параметры модели 3 баженовской свиты

Номер пласта	Мощность, м	ρ , кг/м ³	V_p , м/с	V_s , м/с	Наличие трещин
1	1500	2500	3000	1400	нет
2	1500	2600	3500	1600	нет
3	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
4	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
5	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
6	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
7	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
8	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
9	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
10	2.0/2.0	2700/2300	3800/2400	1700/1100	есть/нет
11	468	2600	3500	1600	нет

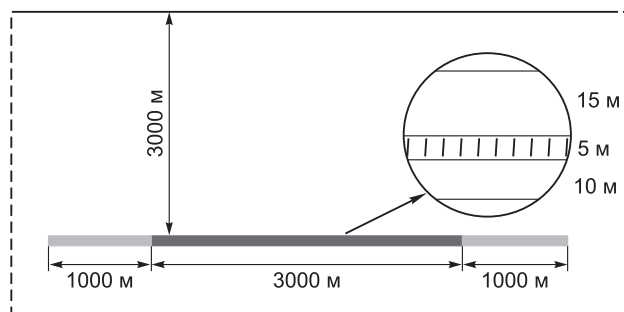


Рис. 3. Модель для расчетов сейсмических откликов от зон мезотрещин в баженовской свите. Вариант внутренней структуры свиты модели 1 (см. табл. 1). Протяженность зон мезотрещин – 3000 м, снижение их концентрации на ее краях – 1000 м.

Для указанных моделей рассчитывались сейсмограммы на базе приема 6000 (7000 м) с шагом между приемниками 50 м. Возбуждение осуществлялось как плоской горизонтальной волной, типа ПФ, так и точно, типа “центр расширения”, с продольным характером колебаний и формой сигнала, близкой к импульсу Берлаге с характерной частотой 30 Гц.

Заполнение трещин жидкостью задавалось условием свободного скольжения на границах, так как идеальная жидкость создает только ортогональную силу на границе.

Результаты расчетов представлялись в виде сейсмограмм записи колебаний на дневной поверхности.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛНОВЫХ ОТКЛИКОВ ОТ ТРЕЩИНОВАТЫХ СЛОЕВ И ПРОПЛАСТКОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ТИПА “ПЛОСКИЙ ФРОНТ”

Для 1-й модели (см. рис. 2, модель 1, рис. 3) результаты расчета волнового отклика представлены в виде сейсмограмм записи на дневной поверхности горизонтальной X - и вертикальной Z -компонент на рис. 4, б, в соответственно.

На первом из них (см. рис 4, б) на X -компоненте на времени $T = 2.93$ с регистрируется однофазная ось синфазности с достаточно интенсивными амплитудами, совпадающая с расположением трещиноватой зоны (см. рис. 4, а). Она представляет фронт обменных рассеянных волн от зоны субвертикальных трещин в карбонатизированном слое в середине свиты. На рис. 4, в с записью вертикальной Z -компоненты регистрируются горизонтальные оси синфазностей: а) от промежуточной границы $T = 0.98$ с, б) от сложного отражения от баженовской свиты $T = 1.86–1.92$ с и в) от 2-кратного отражения $T = 2.7–2.88$ с.

Крупный план записи целевого интервала на X - и Z -компонентах совместно с амплитудными графиками разных временных сечений сложного волнового пакета отражений от баженовской свиты приведен на рис. 5. График з (см. рис. 5, з) с амплитудной аномалии обменных рассеянных волн от трещиноватой зоны для модели 1 дополнен на рис. 6 аналогичными графиками для моделей 2 и 3. Приведенная на рис. 5 информация позволяет отметить, что целевой обменный рассеянный фронт без помех четко выделяется на записи

X -компоненты и соответствует пространственному положению зоны мезотрещин. В то же время, его амплитуда по отношению к максимальному уровню отражения от баженовской свиты на Z -компоненте составляет всего от 2.5 до 6 %. Анализ амплитудных графиков временных сечений сложного отражения от баженовской свиты выявил влияние зоны мезотрещин на амплитуды одной из фаз продольного отражения. Это проявилось в 4-кратном уменьшении амплитуд временного сечения (см. рис. 5, ж, $T = 1.88–1.885$), соответствующее по местоположению трещиноватой зоне. По-видимому, это объясняется рассеянием части энергии отражения от подошвы свиты при прохождении им трещиноватой зоны.

Таким образом, при идеальных условиях возбуждения “плоским фронтом” и регистрации X -компоненты удастся выделить амплитудно-выраженную синфазность обменных рассеянных волн от трещиноватой зоны пятиметрового карбонатизированного пласта в середине баженовской свиты.

Расчеты, выполненные для 2 и 3 моделей структуры трещиноватых зон (см. табл. 2, 3) показали, что амплитуды их откликов превышают приведенные для 1 модели данные в 1.5 и 2.5 раза соответственно (см. рис. 6).

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛНОВЫХ ОТКЛИКОВ ОТ ТРЕЩИНОВАТЫХ СЛОЕВ И ПРОПЛАСТКОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПРИ ТОЧЕЧНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ТИПА “ЦЕНТР РАСШИРЕНИЯ”

При точечном возбуждении в условиях баженовской свиты на сейсмограмме вертикальной Z -компоненты (рис. 7, б) волны, выделенные ранее при возбуждении ПФ (см. рис. 4, в), также присутствуют, но только с гиперболическими годографами и с примерно теми же соотношениями амплитуд. На сейсмограмме с записью X -компоненты (рис. 7, а) волновое поле существенно усложнилось. Вместо одной волны – фронта рассеянных обменных волн (см. рис. 4, б) при ПФ были зарегистрированы: X -составляющие крутых участков гипербол вышеупомянутых продольных отражений, обменная волна первого отражения, а также слабые фрагменты других волн. Амплитуды всех этих волн на порядок меньше своих аналогов на

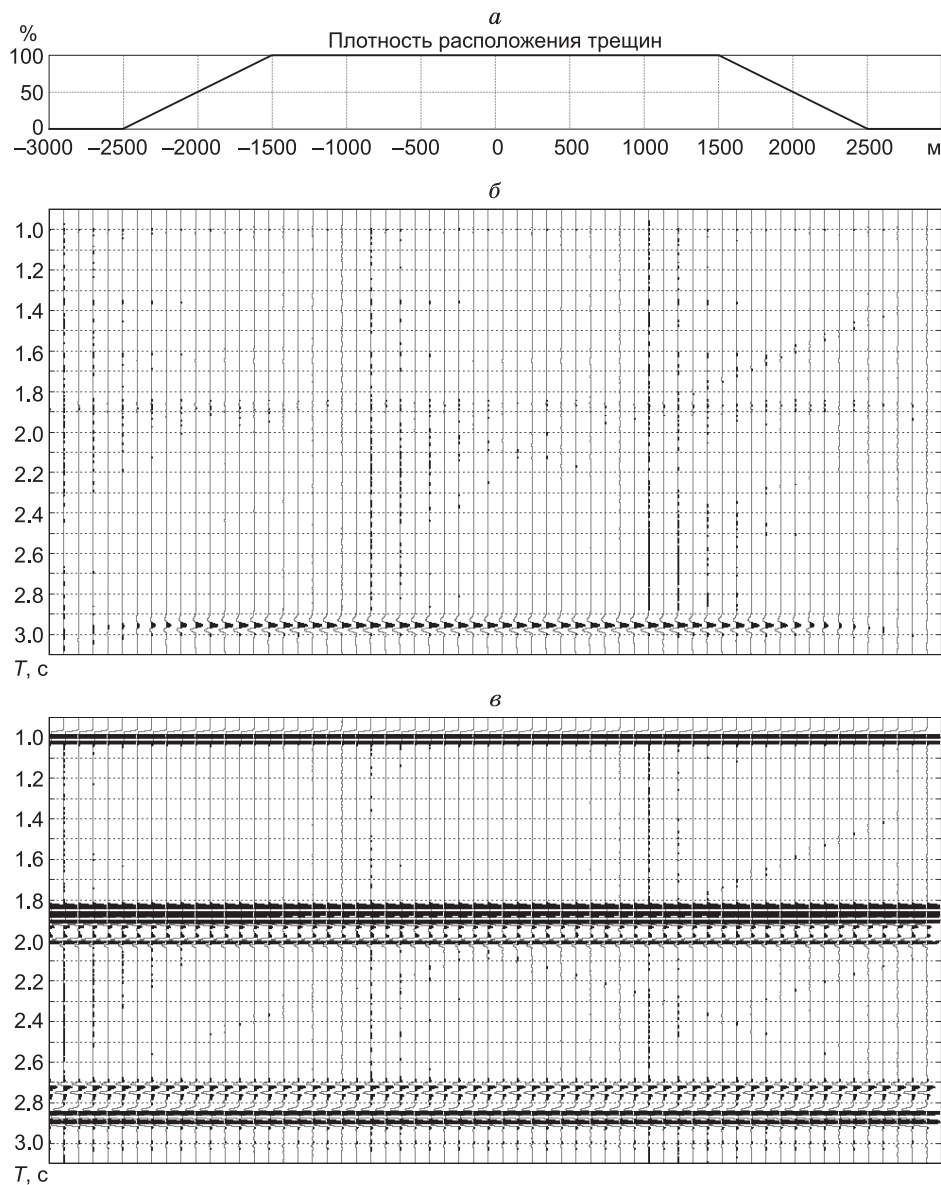


Рис. 4. Сейсмический разрез для модели 1 строения баженовской свиты:

a – график плотности мезотрещин в % от максимальной вдоль профиля наблюдений с расстояниями от центра расстановки приемников; *б* – сейсмический разрез с записью горизонтальной *X*-компоненты; *в* – сейсмический разрез с записью вертикальной *Z*-компоненты.

Z-компоненте и сопоставимы с амплитудой ($A = 5$) целевой волны D_{PS^*} – обменным рассеянным фронтом на времени $T = 2.93\text{--}2.97$ с. Эта волна, образованная наложением единичных дифракций D_{PS} от множества трещин, несет основную информацию о зоне мезотрещин. При точечном возбуждении ее относительная интенсивность на *X*-компоненте к отражению от баженовской свиты PP_{bg} , зарегистрированной на *Z*-компоненте при ПФ, увеличилась с 2–5 % до 10–12 %.

У всех волн, зарегистрированных на *X*-компоненте, отмечается переход на фазу над пунктом возбуждения. Это относится и к целевой волне – обменному рассеянному фронту от зоны трещиноватых пропластков в баженовской свите (D_{PS^*}). По этому признаку и

форме годографа эта волна близка к обменному отражению от поверхности, проходящей по верхним концам трещин.

Основная возможность существенно повысить исходно низкий уровень обменной рассеянной волны связана с накоплением сигнала при оптимальном для нее вводе кинематических поправок. Суммирование записей, полученных при использовании системы многократных перекрытий, вводе соответствующих кинематических поправок и мьютинга, устраняющего большую часть фрагментов мешающих волн, позволило существенно повысить интенсивность целевой обменной рассеянной волны D_{PS^*} . По отношению к опорному отражению PP_{bg} она выросла в среднем в три раза.

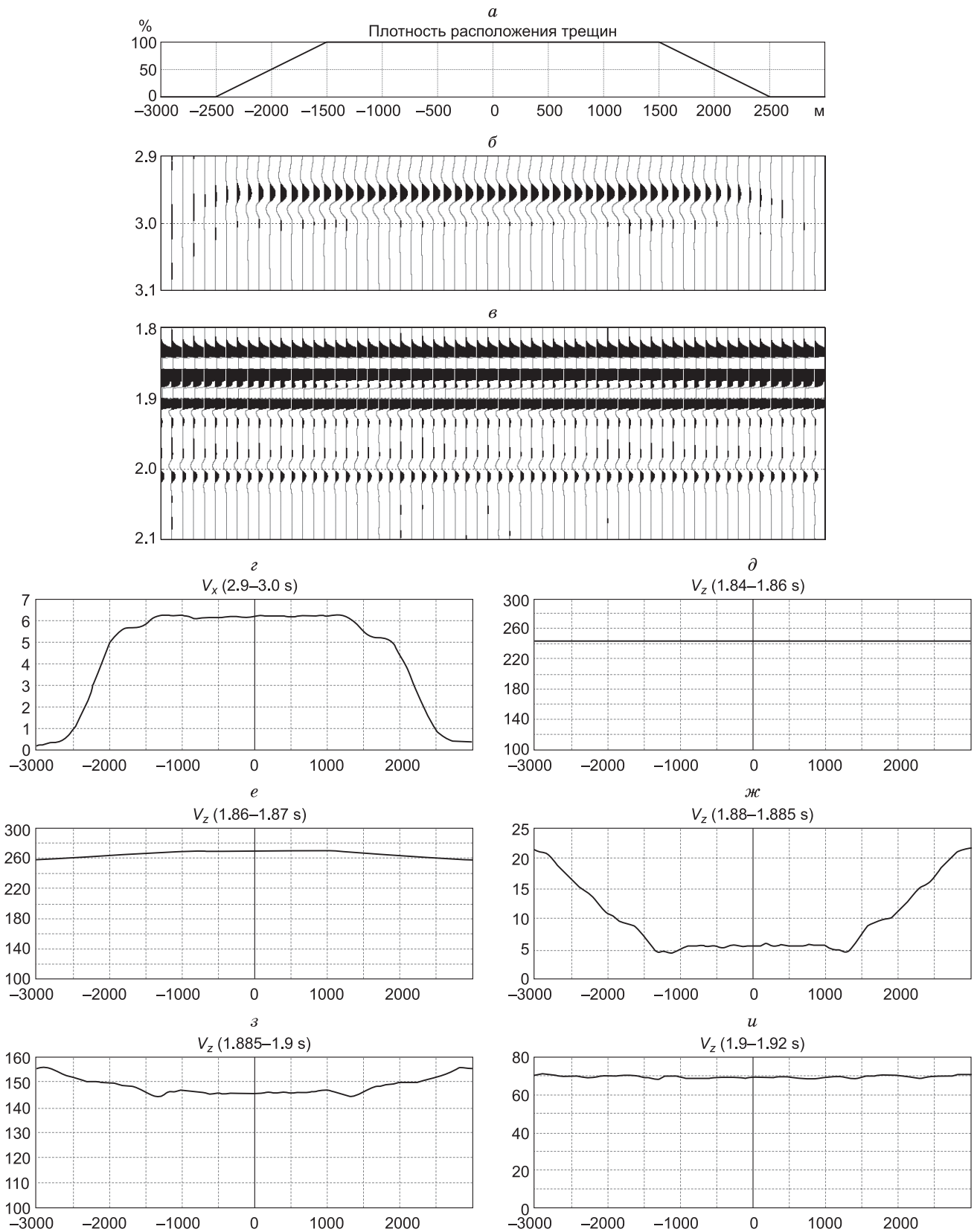


Рис. 5. График плотности мезотрещин вдоль профиля (а), крупный план сейсмической записи интервала баженовской свиты на X- (б) и Z-компонентах (в), з, д, е, ж, з, u – амплитудные графики на заданных временных уровнях.

На рис. 8, *a* приведена сейсмограмма с введенной постоянной во времени кинематической поправкой, спрямившей годограф целевой волны на времени 2.93–2.97 с. На рис. 8, *б* представлена эта же сейсмограмма после мьютинга.

Результаты суммирования на *X*-компоненте по общему пункту взрыва (ОПВ) показаны на рис. 9 для левого, на рис. 10 – для правого флангов и на рис. 11 – для суммы левых и правых флангов с поворотом фазы одного из них.

На исходных одиночных *X*-сейсмограммах (см. рис. 7) волна PP_{bg} в полтора–два раза превышала обменную рассеянную волну D_{PS^*} . Целевая обменная рассеянная волна D_{PS^*} на суммарных временных разрезах обоих флангов существенно повысила свою интенсивность и стала доминирующей, превышая в

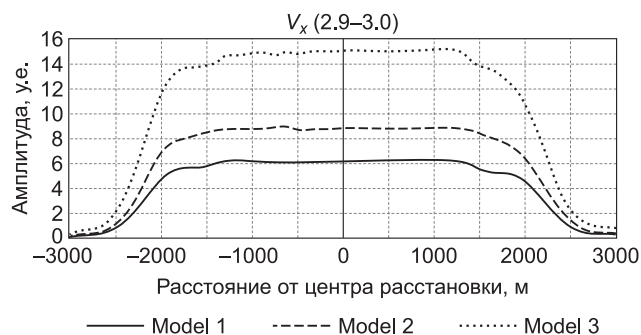


Рис. 6. Графики амплитудных аномалий фронта рассеянных обменных волн для каждой из трех моделей трещиноватости. По вертикальной оси – амплитуды в у.е., по горизонтальной – расстояние от центра расстановки в метрах.

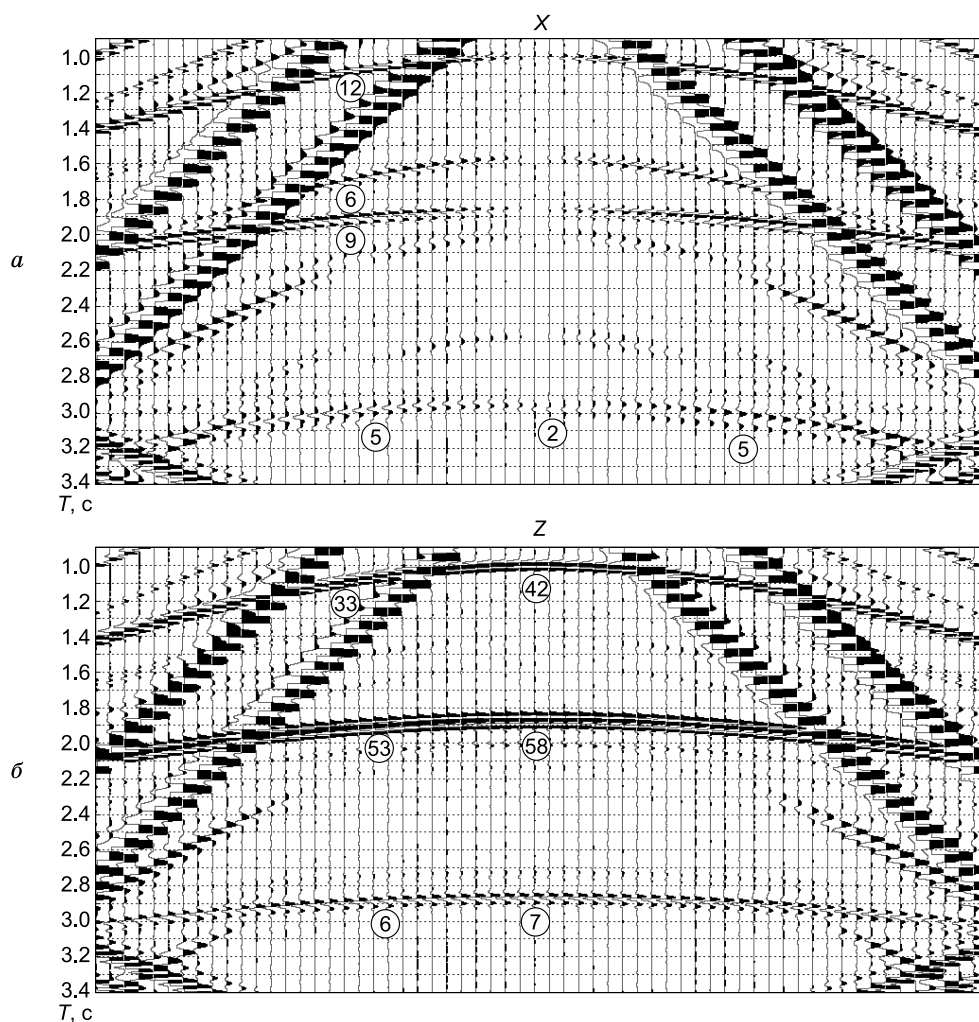


Рис. 7. Сейсмограммы *X*- (*a*) и *Z*-компонент (*б*) при точечном возбуждении для модели 2 (см. рис. 2, модель 2). В кружках приведены значения амплитуд волн. Обозначения волн:

На *X*-компоненте (*a*): $T = 1.0–1.05$ с – *X*-составляющая продольного отражения от 1-й границы PP_j ; $T = 1.5–1.6$ с – обменное отражение от 1-й границы PS_j ; $T = 1.85–2.0$ с – *X*-составляющая продольного отражения от кровли свиты PP_{bg} ; $T = 2.55–2.65$ с – обменное отражение PS ; $T = 2.93–2.97$ с – обменная рассеянная волна от трещиноватой зоны в баженовской свите D_{PS^*} ; На *Z*-компоненте (*б*): $T = 1.0–1.05$ с – продольное отражение от 1-й границы PP_j ; $T = 1.8–1.9$ с – продольное отражение от кровли баженовской свиты PP_{bg} ; $T = 2.85–2.95$ с – многократное продольное отражение $PP_{кр}$.

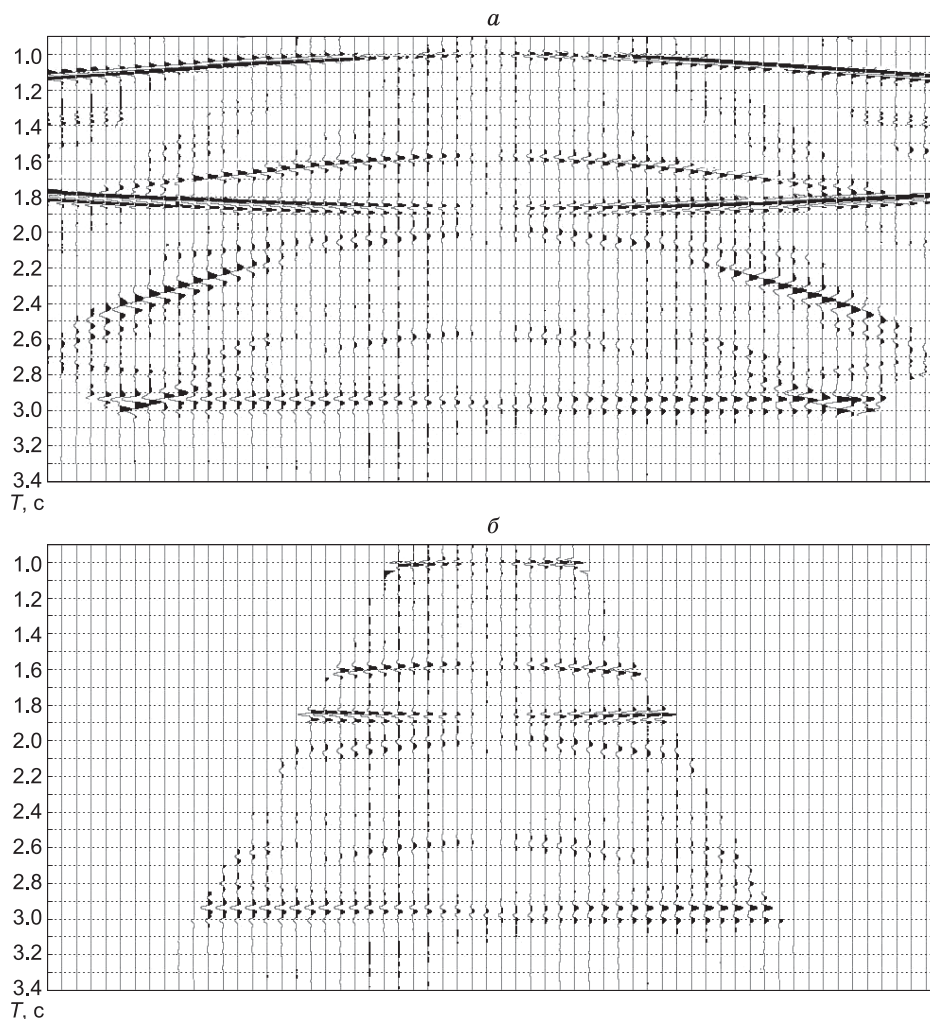


Рис. 8. Сейсмограмма записи X -компоненты:

a – с кинематическими поправками, обеспечившими спрямление обменной рассеянной волны на времени 2.93 с; b – с кинематическими поправками и мьютингом.

полтора раза X -составляющую продольного (PP_{bg}) отражения от баженовской свиты. Изменение их соотношения связано с разной кратностью накапливания из-за мьютинга и оптимальностью кинематических

поправок для D_{PS^*} . Отмечается практическое равенство амплитуд аномалий D_{PS^*} на обоих флангах, но отношение D_{PS^*}/PP_{bg} различается достаточно существенно (для левого фланга – 2.0, для правого – 1.4).

Получение записей для всей центральной расстановки предусматривало общепринятое при использовании обменных отраженных волн суммирование сейсмограмм обоих флангов с коррекцией фазы в одном из них. Значения амплитуд для полной расстановки (табл. 4) свидетельствуют об их общем увеличении в 1.5–1.8 раза при сохранении соотношения целевой волны D_{PS^*} и остальных волн. Отмечается 20 % уменьшение амплитуд D_{PS^*} и PP_{bg} относительно их полных сумм, а их соотношение осталось в среднем таким же, как на флангах.

Аномалии амплитуд обменной рассеянной волны совпадают с зоной развития мезотрещин в пласте. Однако уровень амплитуды фона (уровня колебаний вне объекта рассеивания) относительно аномалии равен 60–70 % от уровня аномалии. Причина кроется, по-видимому, в регистрации почти одновременно с

Таблица 4

Оценки амплитуд для регистрируемых на X -компоненте волн

	PP_l	PS_l	PP_{bg}	$DP S^*$	PS	D_{PS^*}/P_{bg}
Для одиночного точечного возбуждения	12	6	9	5	5	0.55
Для суммы левых флангов	4	7	12	26	4	2.0
Для суммы правых флангов	5	7	18	25	5	1.4
Для суммы левых и правых флангов (с обращенной фазой)	7	13	24	42	7	1.75
Для суммы левых и правых флангов (без обращения фазы)	1	1	1	22	1	22.0

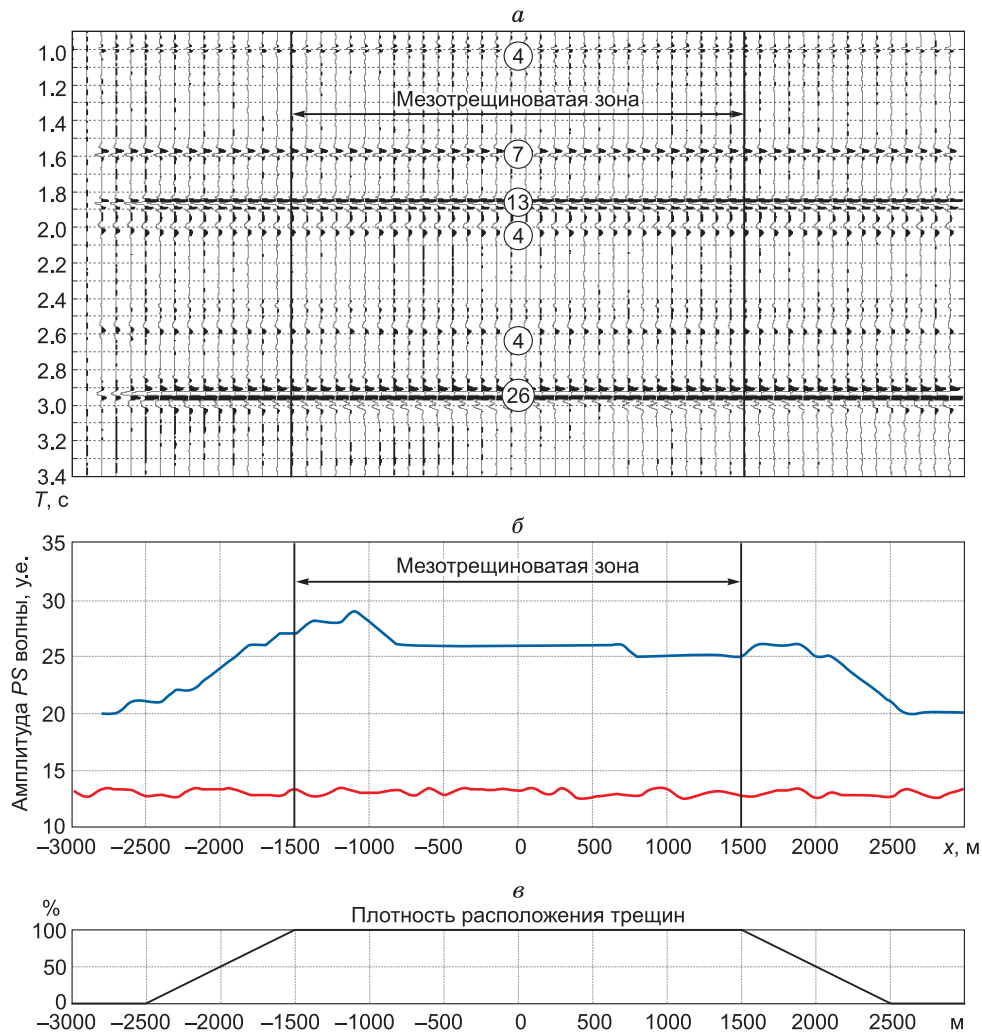


Рис. 9. Суммарный временной разрез сейсмограмм на X -компоненте для левых флангов (a).

Здесь и на рис. 10–12: на суммарных временных разрезах (a) на времени $T = 1.85–1.90$ с – продольное отражение от кровли свиты PP_{bg} , на $T = 2.93–2.97$ с – обменная рассеянная волна от трещиноватой зоны в баженовской свите D_{PS^*} , в кружочках даны амплитуды волн в у.е.; b – график амплитуд вдоль фронта обменной рассеянной волны D_{PS^*} от трещиноватой зоны в баженовской свите (синего цвета), отражения от кровли баженовской свиты PP_{bg} (красного цвета); c – плотность мезотрещин вдоль профиля.

D_{PS^*} X -составляющей многократного продольного отражения (см. рис. 7, $T = 2.9$ с).

Для существенного повышения относительной интенсивности целевой обменной рассеянной волны и максимального ослабления упомянутой волны-помехи, а также других обменных и продольных волн от плоских границ (см. рис. 11) применено суммирование левых и правых флангов без смены фаз, предложенное Н.Я. Мармалевским. Этот прием должен привести к почти нулевым амплитудам упомянутых волн-помех, что гарантирует значительное повышение относительной интенсивности D_{PS^*} . Сложение волновых полей обменных рассеянных фронтов флангов должно сохранить достаточно значимой энергию их разности.

Высокая вероятность этого связана с выявленным ранее [Левянт и др., 2013; Караев и др., 2015] асимметричным характером отклика от трещиноватого пласта из-за обычно небольшого наклона трещин (отклонения

от вертикали). Различие обменных рассеянных полей на разных флангах еще более усугубляется тонкослоистой структурой баженовской свиты, определяющей нестабильный комплексный характер коэффициента отражения от нее.

Оно может проявляться в различии времени вступления волн разных флангов, в различии формы сигнала и величины амплитуд.

Результат, представленный на рис. 12, подтверждает возможность ослабления почти до нуля всех прочих волн за исключением обменной рассеянной волны D_{PS^*} – отклика от мезотрещиноватой зоны. При этом в конкретном случае модели 2 типа это суммирование дало достаточно значимую амплитуду в 22 у.е., а уровень фона 2 у.е. составил всего 10 %.

Характер формирования суммарного сигнала с такой амплитудой поясняется рис. 13, на котором приведено сопоставление на одной временной оси одномерных сигналов фронтов целевой волны D_{PS^*} обоих

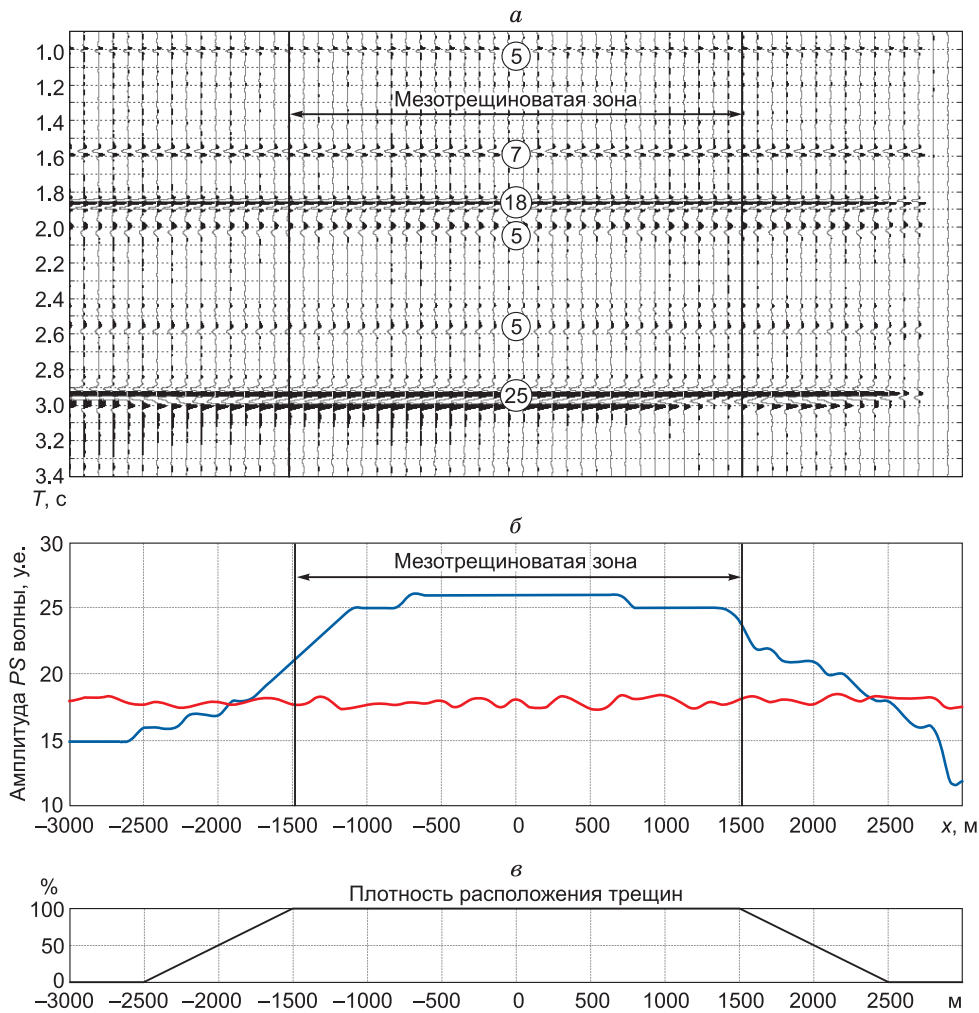


Рис. 10. Суммарный временной разрез сейсмограмм на X-компоненте для правых флангов.

флангов. На нем видно различие времени вступления, амплитуд и формы сигналов обменной рассеянной волны на разных флангах. Причины этого, как отмечалось, во влиянии двух факторов: асимметрии волновых полей D_{PS^*} на флангах, связанной с наклоном трещин, и тонкослоистой структуры свиты, определяющая нестабильность отклика из-за комплексного характера коэффициента отражения.

ВЫВОДЫ

1. Исходный очень низкий уровень обменных рассеянных волн D_{PS^*} от трещин в жестких пластах и пропластках в баженовской свите по отношению к опорному отражению от кровли свиты – PP_{bg} может быть существенно повышен. Так их исходный уровень при возбуждении ПФ к этой продольной волне на Z-компоненте составлял от 2 до 6 %. С переходом на точечное возбуждение он повысился до 9–12 %, а на X-компоненте – до 55–66 % на одиночной сейсмограмме.

2. Применение суммирования записей многократного профилирования с оптимальными для обменной рассеянной волны кинематическими поправками и мьютингом увеличило ее уровень к отражению от ба-

женовской свиты – PP_{bg} на X-компоненте в три раза (до 150 %), что обеспечило удовлетворительное выделение амплитудной аномалии обменной рассеянной волны от трещиноватой зоны.

3. Различие характера рассеянного обменного волнового поля на разных флангах расстановки, связанное с небольшим отклонением трещин от строгой вертикальности, дополнительно осложняется комплексным характером коэффициента отражения из-за тонкослоистой структуры баженовской свиты. Это приводит к сдвигам по времени регистрации, изменению формы сигнала и интенсивности обменной рассеянной волны на разных флангах.

4. Надежность выделения обменной рассеянной волны от трещиноватой зоны значительно повышается за счет суммирования записей X-компонент разных флангов расстановки без коррекции фаз. Эта процедура обеспечивает ослабление практически до нуля волновых обменных отражений и X-составляющих продольных отражений от плоских границ.

5. Энергия разности (или суммы с учетом знака) обменной рассеянной волны обоих флангов, являющаяся показателем трещиноватой зоны, в результате такого суммирования должна сохраниться достаточно значимой. Высокая вероятность этого связана с асим-

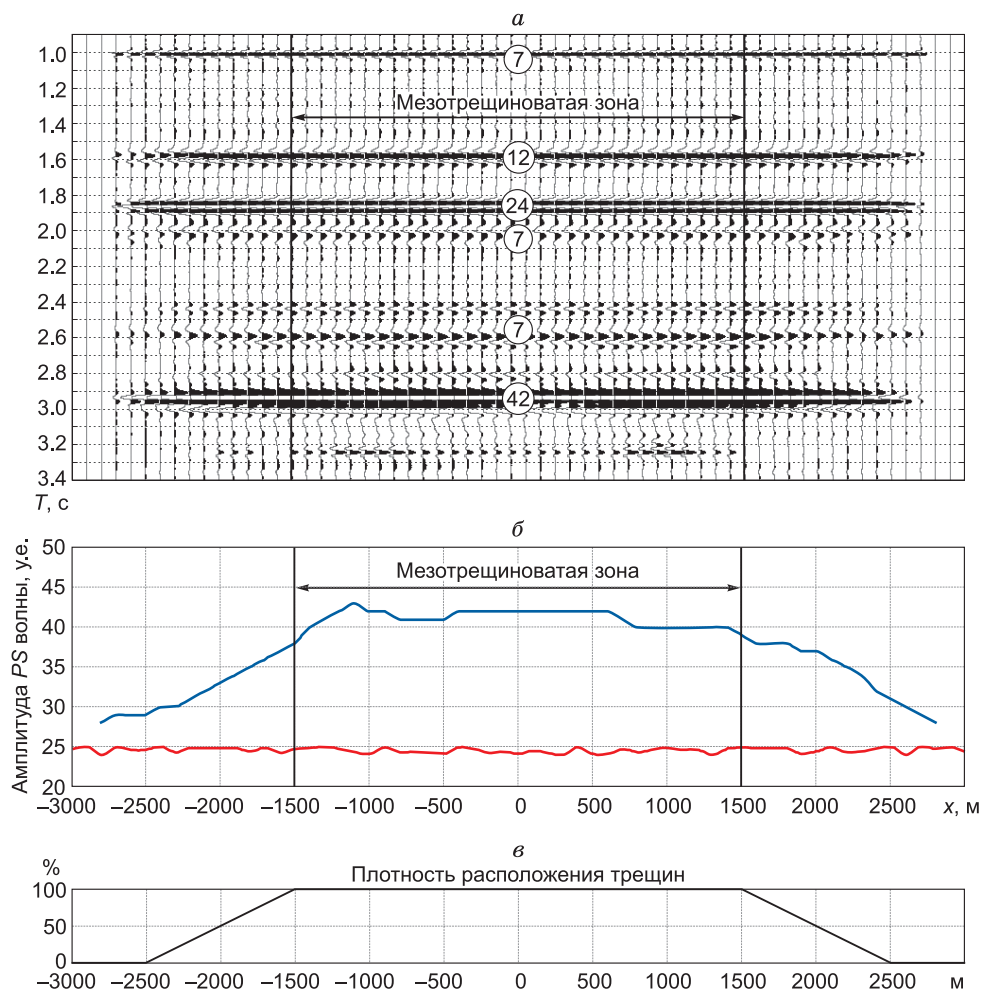


Рис. 11. Суммарный временной разрез сейсмограмм на X -компоненте для левых и правых (с обращением фазы) флангов.

метричным характером отклика от трещиноватого пласта из-за обычно небольшого отклонения трещин от вертикали. Различие обменных рассеянных полей на флангах усугубляется нестабильностью комплексного коэффициента отражения, обусловленного тонкостойкостью свиты

Амплитуда разности рассеянной волны будет определяться не только различием общей интенсивности ее полей на флангах, но и разницей времени их вступления и различием формы записи их волновых фронтов.

В заключение можно отметить, что на основе выполненного численного 2D-моделирования волновых откликов от флюидонасыщенных мезотрециноватых зон в жестких пластах малой мощности и пачках тонких пропластков установлена общая перспективность

их прямого обнаружения при использовании обменных рассеянных волн от трещиноватых зон, регистрируемых горизонтальной X -компонентой.

В целом исследования численным моделированием предварительно выявили принципиальную возможность прямого обнаружения трещиноватых зон в баженовской свите. Необходима апробация метода в реальных условиях с максимальным их учетом для его эффективного применения.

При этом близкое к горизонтали залегание границ, малая мощность зоны малых скоростей и широкое распространение вечной мерзлоты в Западной Сибири определяют благоприятные условия для сохранения достаточной интенсивности поперечных колебаний обменного фронта и подавления волн-помех.

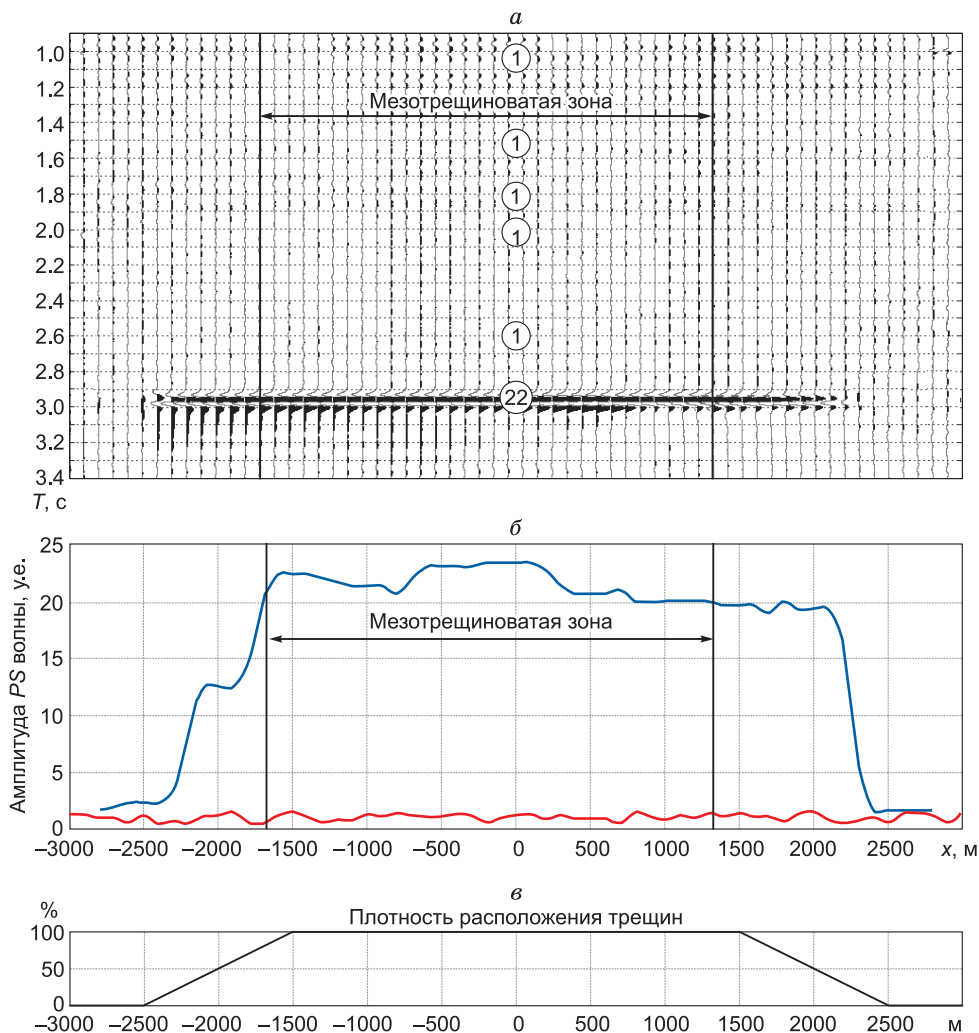


Рис. 12. Суммарный временной разрез сейсмограмм на X-компоненте для левых и правых флангов (без обращения фазы).

Литература

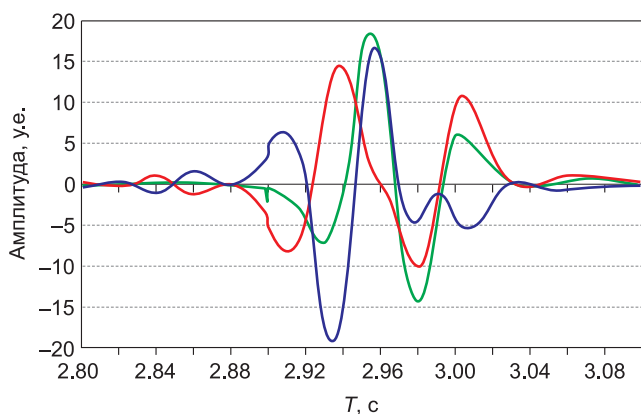


Рис. 13. Сопоставление на временной оси одномерных сигналов обменной рассеянной волны D_{PS}^* на флангах (левом – синем и правом – красном) и их суммы без смены фазы (зеленый цвет).

Гогоненков Г.Н., Некрасова Л.А. Прогноз зон повышенной продуктивности баженовской толщи Западной Сибири сейсморазведкой 3D // Геофизика. Специальный выпуск. 2012. С. 71–77.

Зубов М.Ю., Пормейстер Я.А. Критерии оценки региональных перспектив нефтегазоносности и локального прогноза углеводородных залежей в отложениях баженовской свиты Западной Сибири // Горные ведомости. Тюменский научный журнал. 2005. № 6 (13). С. 30–51.

Караев Н.А., Левянт В.Б., Петров И.Б., Караев Г.Н., Муратов М.В. Оценка методами математического и физического моделирования возможности использования обменных рассеянных волн для прямого обнаружения и характеристики систем макротрещин // Технологии сейсморазведки. 2015. № 1. С. 22–36.

Квасов И.Е., Левянт В.Б., Петров И.Б. Численное моделирование прямых откликов от пластовых зон с субвертикальными флюидонасыщенными мезотрещинами // Технологии сейсморазведки. 2013. № 4. С. 19–36.

Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: ГЕРС, 2006. 480 с.

Кондауров В.И., Фортвов В.Е. Основы термомеханики конденсированной среды. М.: МФТИ, 2002. 336 с.

- Кунин К.Н., Карцева Е.Г., Кашеев Д.Е., Савельева А.В., Золотой Н.В., Бланк А.М., Федина Н.В.** Прогноз продуктивности баженовских отложений // Проблемы и достижения нефтегазовой геологии: Сб. материалов науч.-практ. конф. (27–31 мая 2013 г.). Калининград, 2013. С. 51–54.
- Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В., Быко С.А.** Исследование устойчивости образования фронта рассеянных обменных волн от зоны макротрещин // Технологии сейсморазведки. 2013. № 1. С. 32–45.
- Магомедов К.М., Холодов А.С.** Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988. 288 с.
- Петров И.Б., Холодов А.С.** Численные исследования некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1984. Т. 24, № 5. С. 722–739.
- Ревенко А.В., Бордюг М.А., Немова В.Д.** Сейсмическое моделирование изменений свойств отложений баженовской свиты, основанное на результатах исследований ядра // Проблемы и достижения нефтегазовой геологии: Сб. материалов науч.-практ. конф. (27–31 мая 2013 г.). Калининград, 2013. С. 47–50.
- Славкин В.С., Алексеев А.Д., Колосков В.И.** Некоторые аспекты геологического строения и перспектив нефтеносности баженовской свиты на западе Широкого Приобья // Нефтяное хозяйство. 2007. № 8. С. 100–104.
- Усманов И.Ш., Трофимова Е.Н., Дякина А.В., Карпов А.В.** Нефтенасыщенные известняки баженовской свиты // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО – Югры: Сб. материалов науч.-практ. конф. (г. Ханты-Мансийск, 13–17 дек. 2005 г.). – Ханты-Мансийск: Издат. НафтаСервис, 2006.

*Поступила в редакцию 19 сентября 2015 г.,
в окончательном варианте – 25 октября 2015 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЛЕВЯНТ Владимир Борисович – кандидат технических наук, почетный академик РАЕН, внештатный консультант ОАО “Центральная геофизическая экспедиция”.

E-mail: vbleviant@gmail.com.

КВАСОВ Игорь Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, ассистент профессора кафедры информатики Московского физико-технического института.

E-mail: kvasov@gmail.com.

ПЕТРОВ Игорь Борисович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедры информатики Московского физико-технического института.

E-mail: petrov@mipt.ru.