

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ВОЛН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГЕОСРЕДЫ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. С. Файзуллин, Н. В. Куценко

Введение

Как показано в ряде работ [2, 4, 5], наиболее адекватной моделью геосреды является модель среды со случайно распределенными неоднородностями. Затухание упругих волн в такой среде происходит за счет поглощения в материале пород и рассеяния на неоднородностях. Количественное соотношение этих потерь зависит от структурных особенностей строения пород. В ряде случаев декременты поглощения и рассеяния оказываются одинаковыми [5].

Рассеянные волны в отличие от отраженных и преломленных еще не нашли широкого применения в сейсморазведке, хотя имеется ряд работ, посвященных их применению для выделения трещиноватых зон. В этих работах указанные выше возможности просто постулируются, а обсуждаются в основном вопросы интерпретации получаемых результатов при решении различных задач. В [1] методом численного моделирования сейсмического поля исследованы отраженные и рассеянные волны от зон диффузной кавернозности и трещиноватости. Однако трещиноватость при этом только предполагается и в расчетной модели никак не учитывается. Кроме того, сравнительно большие размеры (максимальные до 1 м) включений типа каверн и большая концентрация микрон неоднородностей (до 10% по объему) позволили в [1] получить рассеянные волны, сравнимые по энергии с отраженными, что в осадочных породах не наблюдается. Поэтому задача исследования волн, рассеянных от трещиноватых областей, остается по-прежнему актуальной. В данной работе методом численного моделирования волновых полей исследуются волны, рассеянные от областей скопления мелких изолированных трещин. Полученные результаты рассмотрены применительно к новому методу локации бокового обзора, но аналогичное исследование может быть проведено и для других методов сейсморазведки.

Методика численного моделирования волновых полей

Моделирование волновых процессов рассеяния проводилось для плоского случая на основе скалярного волнового уравнения, что не отвечает условиям строгой постановки задачи для твердых сред, но позволяет установить основные характеристики рассеяния и выяснить потенциальные возможности различных методов выделения рассеянных волн. При этом рассматривался наиболее интересный для практики случай, когда длина

волны больше размеров трещин. Использовался метод моделирования трещин, подробно описанный в [9], который позволяет моделировать области с большой концентрацией трещин, размеры которых меньше шага сетки и длины падающей волны. При таком подходе моделирование отдельной трещины не требует задания граничных условий на ее поверхности, а сама трещина выступает в виде дипольного источника, форма импульса и амплитуда которого определяются падающей волной. Таким образом, сначала рассчитывается волновое поле без учета трещин, а затем поле, рассеянное на трещинах. При решении последней задачи общий вклад трещин выражается в виде источника следующего вида:

$$s^{sc}(\mathbf{x}, t) = \sum_m \pi a_m^2 \left(A_0(\mathbf{x}, \mathbf{x}_m) q_m(t) + A_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}_m) \frac{1}{c^2} \partial_{tt} q_m(t) + A_4(\mathbf{x}, \mathbf{x}_m) \frac{1}{c^4} \partial_{ttt} q_m(t) \right), \quad (1)$$

где a_m - половина длины m -й трещины; c - скорость среды в окрестности m -й трещины; $q_m(t) = \mathbf{n}_m \nabla p^{inc}(\mathbf{x}_m, t)$; p^{inc} - поле, рассчитанное без учета трещин; $\mathbf{x}_m$ - координата центра m -й трещины; $\mathbf{n}_m$ - вектор нормали к поверхности m -й трещины. Коэффициенты A_0, A_2, A_4 не зависят от времени и быстро убывают от центра трещины $\mathbf{x}_m$. Их вид представлен в работе [9]. Таким образом, поле, рассеянное на трещинах, обозначим его p^{sc} , может рассчитываться отдельно от поля p^{inc} . Очевидно, что полное поле $p = p^{inc} + p^{sc}$. Возможность получения рассеянного поля отдельно от падающего имеет принципиальное значение, так как при этом эффекты рассеяния могут быть исследованы наиболее полно.

Для получения рассеянного поля прямую задачу приходится решать дважды: первый раз - для расчета волнового поля в отсутствие трещин, второй - для расчета поля, рассеянного на трещинах. Математически обе задачи формулируются следующим образом:

$$p_{tt} = c^2 \Delta p + s(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

где $s(\mathbf{x}, t)$ - источник; c - скорость распространения волн; Δ - оператор Лапласа; $p(\mathbf{x}, t)$ - волновое поле; $\mathbf{x} = (x, z)$. В первом случае, при расчете p^{inc} , $s(\mathbf{x}, t)$ задается произвольно (например, импульс Риккера), во втором, при расчете p^{sc} , определяется формулой (1).

Для аппроксимации уравнения (2) используется конечно-разностная схема, предложенная в работе [7]. Данная схема имеет четвертый порядок аппроксимации

по временной координате, десятый по пространственным координатам и записывается следующим образом:

$$p^{n+1} = -p^{n-1} + 2p^n + c^2 \Delta t^2 \left(\frac{\partial^2 p^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^n}{\partial z^2} \right) + \frac{c^4 \Delta t^4}{12} \left(\frac{\partial^4 p^n}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 p^n}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 p^n}{\partial z^4} \right). \quad (3)$$

Вторая производная по пространственной координате в (3) заменяется следующим выражением:

$$\frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(w_0 p_i + \sum_{k=1}^5 w_k (p_{i+k} + p_{i-k}) \right). \quad (4)$$

Значения коэффициентов w_k в (4) приведены в работе [7].

Для того чтобы свести отражения волн от границ сетки к минимуму, применяются два типа граничных условий. Сначала волновое уравнение на границе области заменяется параксиальным волновым уравнением, описывающим распространение волн лишь в одном направлении [6, 8]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Такая замена обеспечивает достаточное поглощение волн лишь в направлении нормали к границе области. Затем применяются условия поглощения, подробно описанные в работе [10]. Для правой границы, например, они выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \epsilon(x) \left(\frac{\partial p}{\partial t} + c \frac{\partial p}{\partial x} \right),$$

где $\epsilon(x)$ - коэффициент затухания.

Применение двух типов поглощающих граничных условий позволяет минимизировать энергию волн, отраженных от границ вычислительной области.

Моделирование рассеяния волн от областей со случайно распределенными трещинами

Моделирование проводилось на сетке с шагом по пространственным координатам $\Delta x = \Delta z = 5$ м и по временной координате $\Delta t = 0,001$ с, размер сетки равнялся 300×300 точек по координатам x и z соответственно, скорость распространения волн была равна 2500 м/с. В области с трещинами каждый узел сетки содержал трещину, длина которой менялась случайным образом от 1 до 200 см, также случайно менялась ориентировка трещин. В первом приближении такая область соответствовала модели среды со случайно распределенными трещинами. Размеры областей рассеяния (здесь и в дальнейшем так обозначаются области с трещинами) приведены в табл. 1. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1. Центры областей рассеяния на всех моделях находятся в центре вычислительной сетки. Положение излучателя относительно верхней границы области менялось для каждой модели так, чтобы расстояние от излучателя до верхней границы области рассеяния оставалось постоянным. В качестве импульса падающей волны (далее называется

1. Параметры области с трещинами для различных моделей

Модель	Размер области рассеяния	Число трещин
1	50 × 50 м	121
2	100 × 100 м	441
3	200 × 200 м	1681
4	1450 × 30 м	2037

зондирующим импульсом) использовался импульс Риккера с доминирующей частотой 25 Гц.

Волновые картины для четырех моделей приведены на рис. 2 (см. цвет. вкл.), вид рассеянных импульсов и соответствующие им амплитудные спектры - на рис. 3 (а, б, в, г). На этом же рисунке показан зондирующий импульс и соответствующий ему амплитудный спектр. Рассеянные назад импульсы регистрировались в точке излучения, рассеянные вперед и зондирующий - в точке, симметричной положению излучателя относительно центра области рассеяния.

Как уже отмечалось выше, рассеянное и падающее поля рассчитываются отдельно, поэтому получение сравнительных оценок амплитуд рассеянных импульсов не представляет затруднений (табл. 2). При этом сравнение проводилось через амплитуду импульса в падающей волне, регистрируемой в той же точке, что и импульс волны, рассеянной вперед. Как видно из табл. 2, максимальная амплитуда импульса рассеянной назад волны практически не зависит от размеров области рассеяния (см. табл. 1), за исключением модели 1, на которой указанная область в отличие от остальных моделей занимает треть зоны Френеля по горизонтали. Длительность импульса рассеянной назад волны увеличивается с увеличением размеров области рассея-

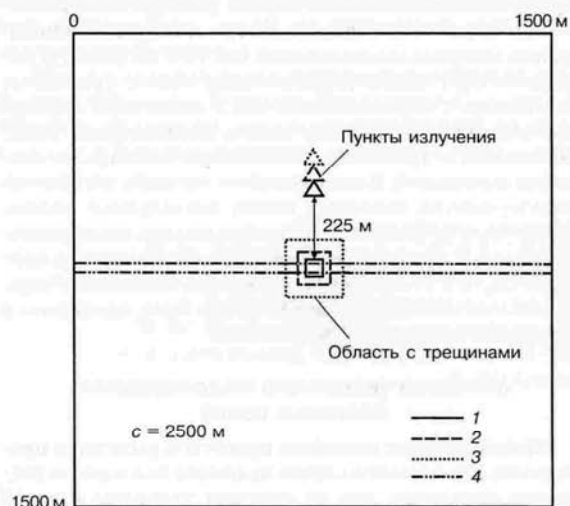


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по изучению рассеяния волн: положения излучателей на моделях 1 и 4 совпадают; 1 - модель 1; 2 - модель 2; 3 - модель 3; 4 - модель 4

ния по вертикали (см. рис. 3). Это можно объяснить тем, что в формировании рассматриваемой волны непосредственно участвуют все участки области рассеяния с соответствующим сдвигом во времени. Как видно из рис. 3, максимум амплитудного спектра импульса рассеянной назад волны на моделях 1, 2, 3 смещается в область высоких частот одинаково, примерно на 5 - 7 Гц, а на модели 4 такого смещения не наблюдается, что может быть связано с большой протяженностью области рассеяния по горизонтали. Следовательно, рассеяние на высоких частотах происходит более интенсивно, но без зависимости от размеров области рассеяния по вертикали.

Совершенно по-другому происходит образование и распространение рассеянной вперед волны. Как видно из рис. 3 и табл. 2, максимальная амплитуда импульса возрастает с увеличением размеров области рассеяния (см. табл. 1), смещение максимумов амплитудного спектра зависит от размеров указанной области, однако длительность импульса остается практически одинаковой на всех моделях.

Рассмотренные выше особенности волн могут быть объяснены тем, что рассеянные вперед волны образуются по мере продвижения падающей волны, распространяющейся в том же направлении и с той же скоростью, а образование рассеянной назад волны происхо-

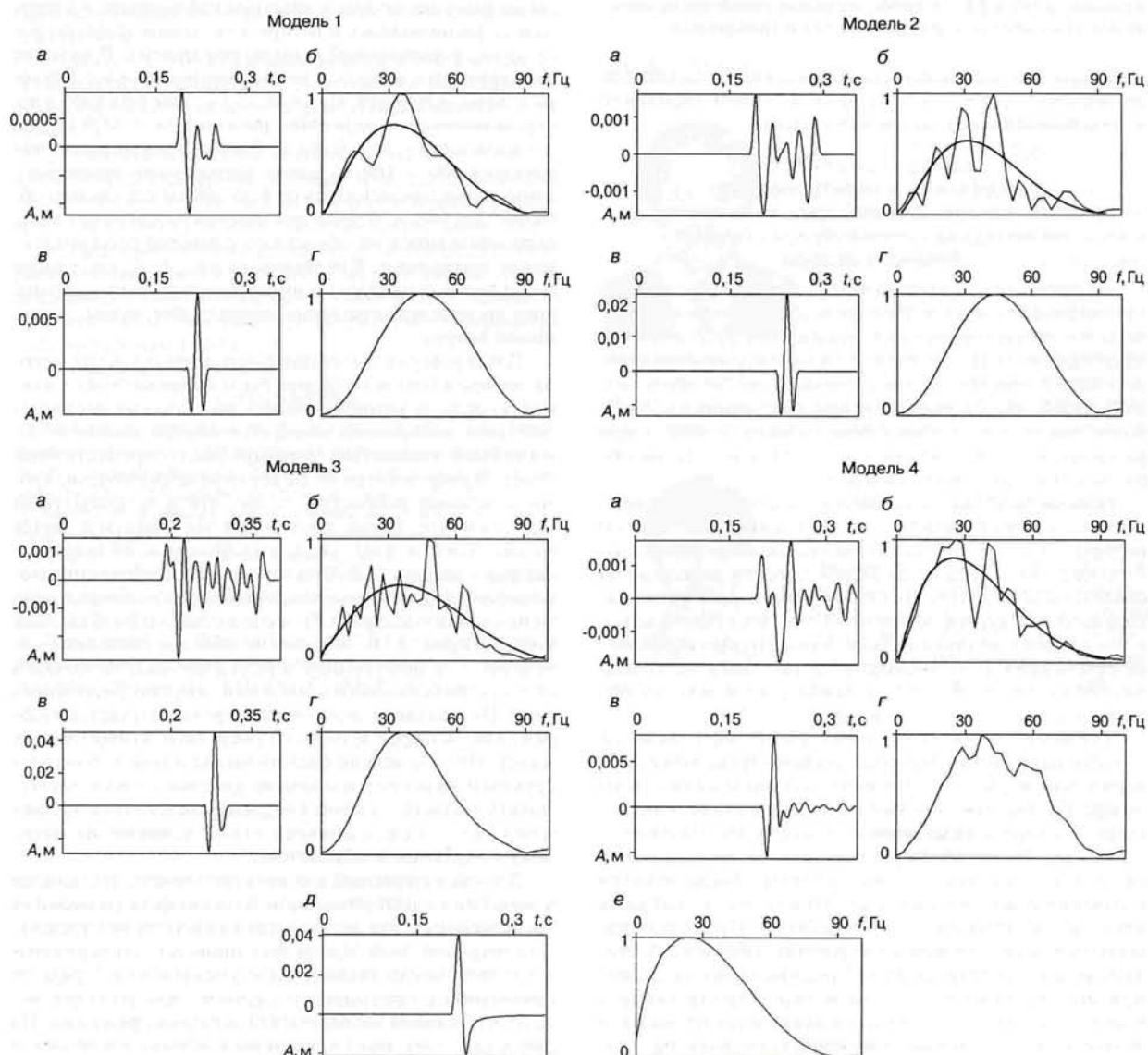


Рис. 3. Примеры рассеянных импульсов и их спектров:

а - рассеянный назад импульс, регистрируемый в точке расположения источника; б - его спектр (более толстой линией изображена осредняющая функция); в - рассеянный вперед импульс, регистрируемый в точке, симметричной расположению источника относительно области с трещинами; г - его спектр; д - импульс проходящей волны, регистрируемый в точке регистрации рассеянной вперед волны; е - его спектр; А - амплитуда волны, умноженная на 10^6

2. Отношение максимальных амплитуд импульсов различных волн

Отношение амплитуд	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
$A_{ПВ}/A_{РВ}$	52,5	15,8	7,6	45,6
$A_{РВ}/A_{РН}$	5,44	10,8	23,4	3,57
$A_{ПВ}/A_{РН}$	285,6	170,6	177,8	162,8

Примечание: РВ – рассеянная вперед, РН – рассеянная назад, ПВ – падающая волна, РН – измерена в точке излучения, а ПВ и РВ – в точке, симметричной точке излучения относительно центра области с трещинами.

дит на разных участках области рассеяния с задержкой во времени, определяемой прохождением падающей волны в противоположном направлении.

Оценка возможности выделения и оконтуривания областей повышенной трещиноватости по методике сейсмической локации бокового обзора

На основании рассмотренных результатов численного моделирования нельзя проводить количественные расчеты по соотношению интенсивностей рассеянных и падающих волн. Из сопоставления на качественном уровне следует, что волны, рассеянные назад от области с небольшой концентрацией трещин (1 трещина на 25 м^2), более чем на два порядка слабее падающих волн, а при размерах области, превышающих длину волны, на порядок слабее рассеянных вперед.

Однако рассеянные назад волны обладают особенностью, которая представляет большой практический интерес. Эта особенность связана с зависимостью длительности импульса от размеров области рассеяния и свидетельствует о том, что вклад участков области, находящихся за первой зоной Френеля, достаточно велик и соизмерим с вкладом от этой зоны. Отсюда появляется принципиальная возможность выделять не только начальную часть области рассеяния, но и всю эту область, т. е. определять ее контуры.

Указанная особенность волн, рассеянных назад от области со случайно распределенными трещинами, уже используется в методе сейсмической локации бокового обзора [3]. Однако, как уже отмечалось выше, еще остался ряд нерешенных вопросов по его применению.

В этом методе апертуры излучения и приема выносятся за область исследуемого объема. Число пунктов излучения и приема достигает 100 и более, а кратность накопления сигналов – 10 000 и более. Процедура накопления осуществляется следующим образом. Исследуемый массив делится на кубические блоки со стороной меньше половины длины волны, в центр каждого блока осуществляется фокусирование волн от всех излучателей с синфазным суммированием волн на приемниках от каждого излучения, т. е. амплитуды всех импульсов, приходящих в центр кубического блока и от центра блока ко всем приемникам, суммируются и возводятся в квадрат. Поскольку колебания не гармонические, получаемую величину условно можно назвать энергией рассеянной волны, как это и делается на практике.

Каждому блоку приписывается полученное значение энергии, по максимальным значениям которой выделяют область рассеяния.

В отличие от отраженных и преломленных, рассеянные назад волны не выделяются на сейсмограммах, что ставит под сомнение сам факт их существования. Поэтому было интересно увидеть их на моделях с использованием методики наблюдений, аналогичной методике локации бокового обзора, что и было осуществлено во втором эксперименте. На рис. 4, а (см. цвет. вкл.) приведена схема эксперимента, которая отображает систему наблюдений в методе локации бокового обзора для плоского случая. В эксперименте 60 приемников были размещены равномерно вдоль апертуры наблюдения, а 3 излучателя располагались в центре и по краям апертуры излучения, совмещенной с апертурой приема. В качестве зондирующего импульса использовался импульс Риккера с доминирующей частотой 25 Гц, шаг сетки по пространственным координатам равнялся $\Delta x = \Delta z = 10 \text{ м}$, а по временной – $\Delta t = 0,001 \text{ с}$. Размер области рассеяния составил $400 \times 160 \text{ м}$, длина произвольно ориентированных трещин менялась от 1 до 500 см случайным образом. На рис. 4, б приведен пример рассеянного поля, образовавшегося на области со случайно распределенными трещинами. Как видно из рис. 4, б, рассеянная назад волна существует и имеет довольно четкий фронт, хотя по интенсивности она много слабее волны, рассеянной вперед.

Для проверки потенциальных возможностей метода локации бокового обзора была выбрана более сложная модель, в которой область со случайно распределенными трещинами находится внутри пласта с пониженной скоростью, имитирующего продуктивный пласт. В этом эксперименте все параметры модели, кроме пластовых скоростей, те же, что и в предыдущем эксперименте. Схема проведения эксперимента дается на рис. 5, а (см. цвет. вкл.), а изображение области рассеяния – на рис. 5, б. При получении изображения использовалась методика локации бокового обзора с применением процедуры АРУ и специального фильтра. Как видно из рис. 5, б, положение области рассеяния совпадает с ее положением в исходной модели только в области максимальных значений энергии рассеянных волн. По меньшим значениям энергии получается изображение, которое к области рассеяния отношения не имеет. Отсюда можно сделать вывод о том, что по рассеянным назад волнам можно довольно точно восстановить область со случайно распределенными трещинами, но с определенными ограничениями на методику получения изображения.

Другой интересный для практики вопрос заключался в выяснении потенциальной возможности разделения трещиноватых зон по степени концентрации трещин. Для решения этой задачи был проведен эксперимент, в котором число трещин было уменьшено в 2 раза по сравнению с предыдущим случаем, при этом все остальные условия эксперимента остались прежними. На рис. 6 (см. цвет. вкл.) приведены изображения областей рассеяния, полученные в обоих экспериментах без применения процедуры АРУ. Поэтому форма изображения, представленного на рис. 6, а, несколько отличается от полученной ранее (см. рис. 5, б). Как видно из рис. 6, максимальное значение энергии рассеянных волн с сокращением числа трещин уменьшается, хотя линей-

К статье "О возможности применения рассеянных волн для изучения трещиноватости геосреды по данным численного моделирования"

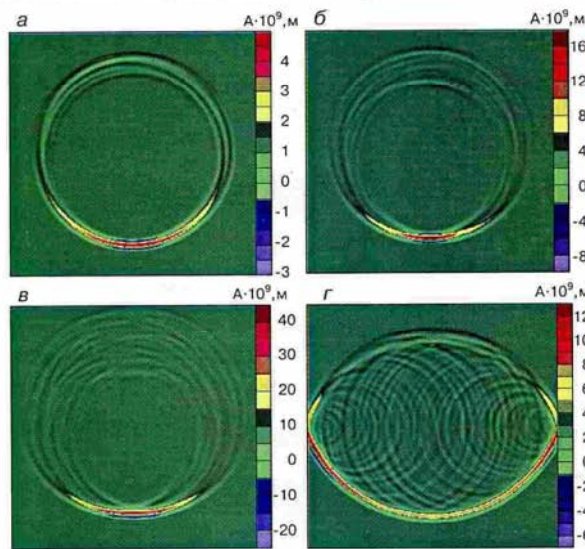


Рис. 2. Поля рассеянных волн на областях со случайно распределенными трещинами в момент времени $t = 0,35$ с: области со стороной квадрата: а - 50 м ($\lambda/2$), б - 100 м (λ), в - 200 м (2λ), г - область в виде прямоугольника толщиной 30 м ($0,3\lambda$), длиной 1450 м, λ - длина волны; А - амплитуда волны; волна, распространяющаяся вниз от центра - рассеянная вперед

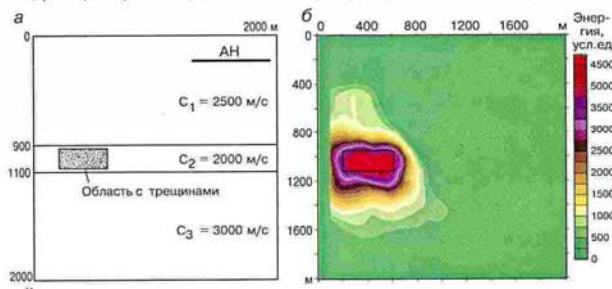


Рис. 5. Схема проведения эксперимента (а) и изображение области со случайно распределенными трещинами (б), полученное по методике локации бокового обзора

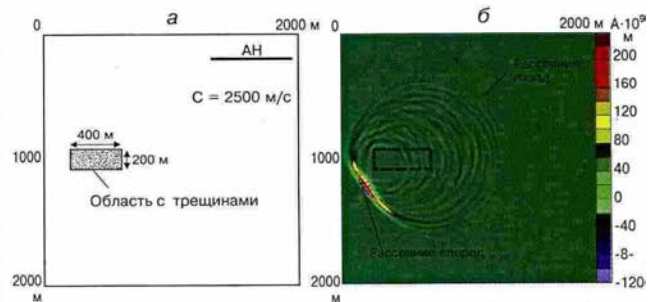


Рис. 4. Схема проведения эксперимента (а) по наблюдению рассеянных волн и волновая картина, полученная в момент времени $t = 0,75$ с (б): АН - апертура наблюдения; А - амплитуда волны

Рис. 6. Изображение области с трещинами, полученное по методике локации бокового обзора, для разных концентраций трещин:

а - 697 трещин; б - 338 трещин; система наблюдений и параметры модели те же, что и на рис. 5, а

