

Ал. А. Ковтун

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В МОДЕЛЯХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛОВ С КОНТАКТОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ

Данная работа продолжает исследования [1], основанные на численном моделировании сейсмических волновых полей, возбуждаемых точечным источником в упругих слоистых средах, имеющих на границах раздела условия проскальзывания. В работе [1] основное внимание уделялось изучению свойств волнового поля, регистрируемого во внутренних точках среды при использовании геометрии системы наблюдений метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП). В настоящих исследованиях, в отличие от [1], анализируются результаты численного моделирования низкочастотных волновых полей, возбуждаемых и регистрируемых в слое при системе наблюдений, подобной межскважинному просвечиванию.

Рассматриваются три простейшие модели сред: упругий слой на упругом полупространстве (М-1), упругий слой между жидким и упругим полупространствами (М-2), и упругий слой между двух упругих полупространств (М-3). Во всех моделях на границе слоя и упругого полупространства задается контакт с условиями проскальзывания. Указанные модели обладают некоторыми общими свойствами, обусловленными особенностями поведения коэффициентов отражения и обмена (типа PS и SP) волн при условиях проскальзывания на границах слоя. Подробнее эти вопросы обсуждаются, например, в [2, 3]. Перечисленные модели сред являются «родственными» еще более простым моделям: упругий слой (лед) на жидком полупространстве (М-0-1) и упругий слой между двух жидких полупространств (М-0-2). Последние две модели изучались многими авторами, например, в [4], и интересны тем, что при выполнении определенных условий в слое может возбуждаться интерференционная волна с резонансными свойствами, названная волной *Stary* (*Cr*) [5] (эта волна экспериментально наблюдалась при сейсмических исследованиях на плавающей льдине). Интерференционные волны с резонансными свойствами, подобными *Cr*-волне, могут распространяться также и в средах, описываемых моделями М-1, М-2 и М-3. Такие волны подробно исследовались (в основном в случае модели среды М-1) в работах П. В. Крауклиса и др. [3, 6, 7, 8], где они были названы *Kr*-волной. Несмотря на высокую степень теоретической изученности перечисленных моделей сред, численное их исследование еще не получило достаточно полного отражения в публикациях [7, 8], поэтому представляется уместным восполнить этот пробел в настоящей работе.

Моделирование проводилось при помощи программы OASP из комплекса OASES, разработанного Н. Schmidt [9], реализующей 2D-вычисления полного волнового поля (горизонтальной и вертикальной компонент скорости вектора смещения частиц) в осесимметрической слоисто-однородной среде на основе численного интегрирования по волновому числу (горизонтальной компоненте волнового вектора) и применения метода

«глобальной» матрицы. В программе OASP предусмотрена возможность комбинирования жидких, твердых упругих, а также упруго-пористых флюидонасыщенных сред Био. Для моделирования условий скользящего контакта на границах упругих сред (не предусмотренных в OASES) в модель вводились тонкие, толщиной 0,1 см, прослойки жидкости с значениями скорости и плотности (v_p , ρ), характерными для воды. Расчет поля производился в точках регулярной сетки наблюдений, позволяющей формировать сейсмограммы как для вертикального профиля на удалении r от источника, так и для горизонтального на некоторой глубине d . При вычислении результирующих трасс полного волнового поля использовались импульсы с доминирующей частотой 40 или 70 Гц.

Рассмотрим наиболее изученную модель среды, а именно М-1 [3, 8], в которой верхняя граница — дневная поверхность, и на границе упругого слоя с упругим полупространством задан контакт проскальзывания.

В наших расчетах параметры используемых моделей заимствованы из [8] и имеют в случае слоя с пониженной скоростью (М-1-НС) следующие значения: $v_{p0} = 4000$ м/с, $v_{s0} = 2000$ м/с, $\rho_0 = 2.5$ г/см³ для слоя мощностью $h = 50$ м и соответственно $v_p^{hs} = 5000$ м/с, $v_s^{hs} = 2500$ м/с, $\rho^{hs} = 2.5$ г/см³ для нижнего полупространства. Во втором варианте (неконтрастной) модели (М-1-НК) упругие параметры слоя и полупространства совпадают между собой. Сосредоточенный источник типа центра давления задан в слое на глубине $z_s = 5$ м ниже дневной поверхности. Точки наблюдения расположены по системе вертикальных профилей в интервале глубин $d = 0 \div 60$ м или горизонтальных профилей, протяженностью r от 100 м до 3 км.

Проведенные расчеты подтверждают возбуждение поля Кг-волн как в первом, так и втором вариантах модели М-1. Эта волна, как и в результатах вычислений, представленных в [8], проявляется в большей мере на горизонтальной компоненте поля в виде квазимонохроматического волнового пакета (рис. 1 для М-1-НС и рис. 2 для М-1-НК). Однако интенсивность волны Кг по нашим расчетам более низкая, чем в [8], по отношению к интенсивности рэлеевской волны. Расчеты поля на разных глубинах в слое показывают, что интенсивность Кг-волны на горизонтальной компоненте максимальна в окрестности кровли слоя, уменьшается в средней части слоя и снова возрастает при приближении к нижней границе, на которой действуют условия контакта проскальзывания. На вертикальной компоненте поля интенсивность волны Кг принимает наибольшие значения в интервалах глубин между средней частью слоя и его границами и минимальное — в окрестности кровли и подошвы слоя. Отмечается также зависимость интенсивности поля Кг-волны от мощности слоя. В полупространстве $z > h$ волна Кг не образуется.

Поле волны Кг опережает по времени волну Рэлея и локализовано (в случае модели М-1-НС) в интервале между моментами вступления головных и «прямых» P -волн и S -волн. Видимая групповая скорость волны Кг (как в [8]) составляет ~ 2600 м/с. При распространении вдоль слоя Кг-волна затухает с расстоянием примерно так же, как рэлеевская мода (рис. 2).

В терминах лучевой интерпретации Кг-волна формируется в результате резонансного характера интерференции полей многократно отраженных от границ слоя волн вследствие особенностей поведения (вблизи предельного угла падения) коэффициентов отражения и обмена продольных и поперечных волн.

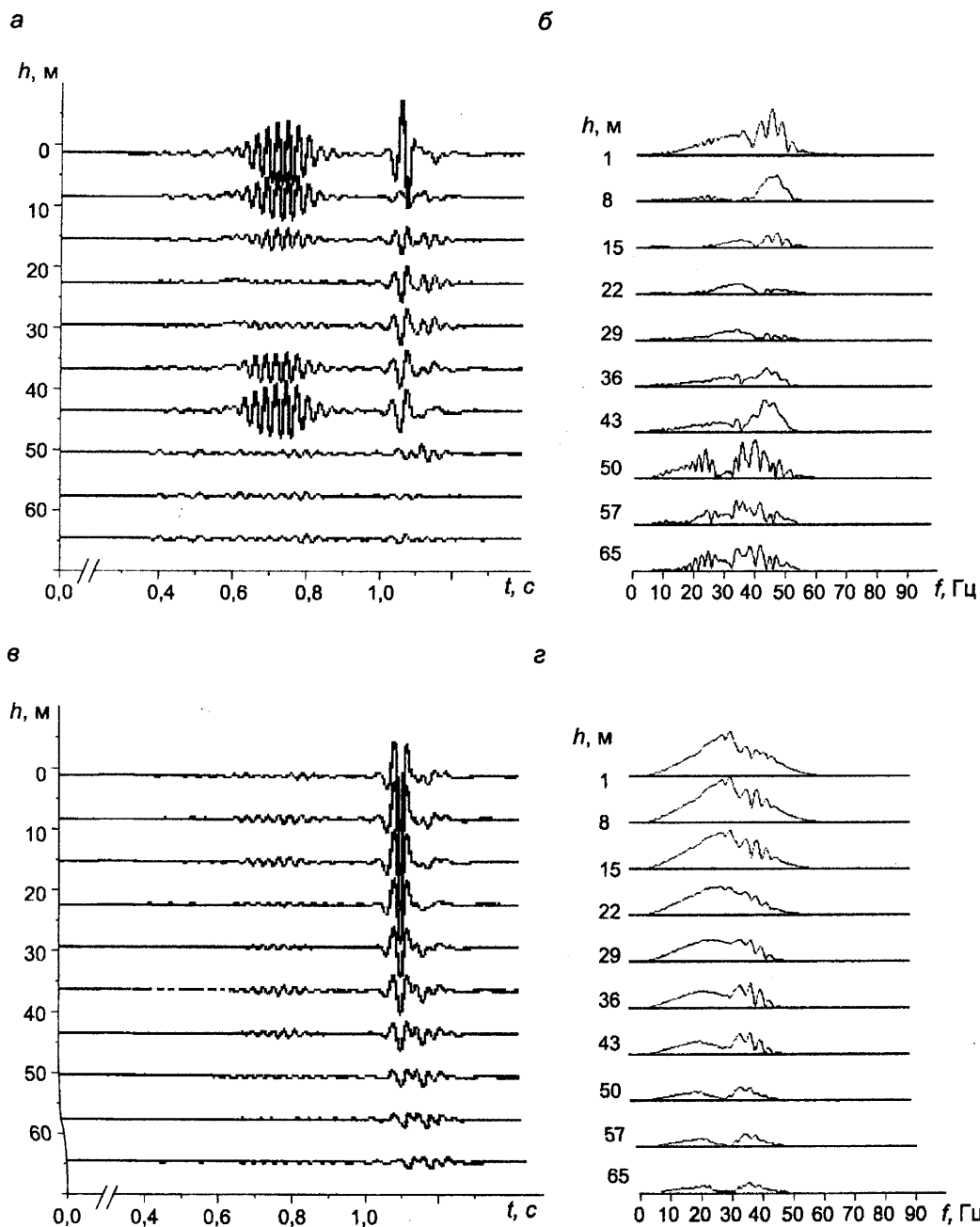


Рис. 1. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров радиальной (а), (б) и вертикальной (в), (г) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-1-НС. Мощность слоя $h = 50$ м; удаление от источника $r = 1600$ м; источник на глубине $z_s = 5$ м

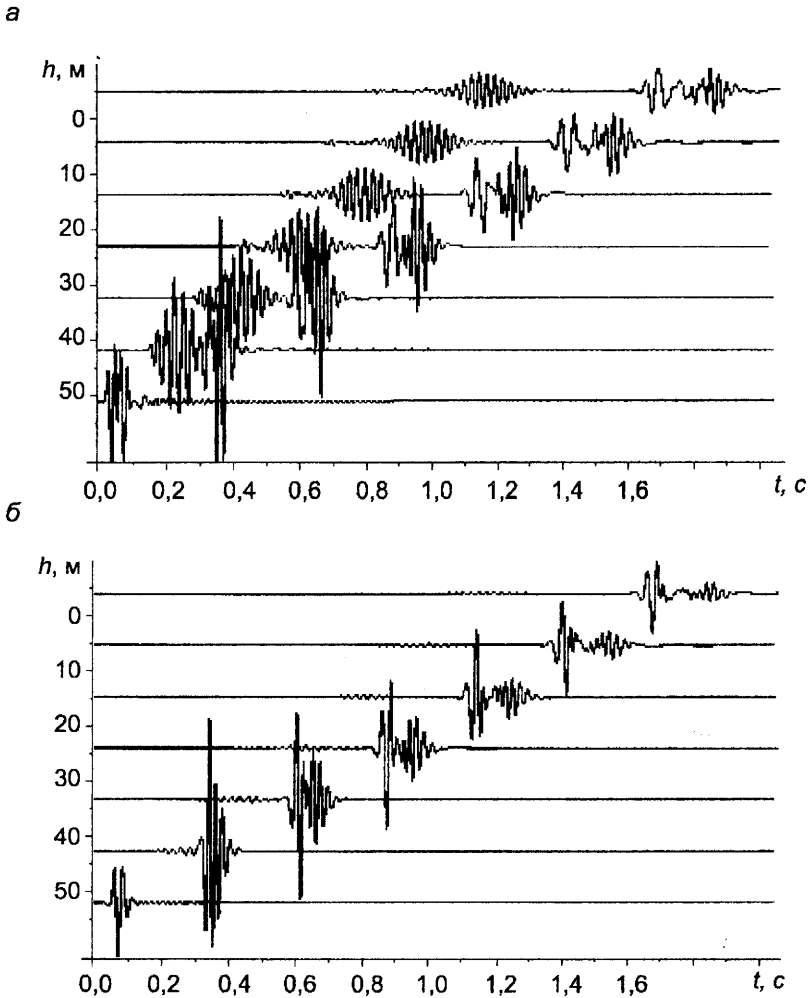


Рис. 2. Сейсмограммы радиальной (а) и вертикальной (б) компонент поля горизонтального профиля наблюдения при использовании АРУ для модели М-1-НК. Глубина точек профиля $d = 40$ м; $h = 50$ м; $z_a = 5$ м

В рамках теории метода контурных интегралов образование модальных Кг-волн обосновывается в работе [3] существованием особых комплексных корней дисперсионного уравнения задачи, траектории движения которых при определенных значениях параметров касаются мнимой оси комплексной плоскости (переменной интегрирования). (В представлении вычислительного метода, реализуемого в используемых кодах [9], упомянутые корни выходят на вещественную ось.) Образующиеся при этом волноводные моды имеют резонансный характер. Это проявляется в том, что Кг-мода будет наблюдаться с максимальной интенсивностью в том случае, когда преобладающая частота импульса, посылаемого источником, близка к резонансной частоте.

Значения резонансных частот, связанных с формированием Кг-мод, определяются согласно [3, 5] формулой

$$f_n^{(K\tau)} = \frac{nv_{s0}}{h\sqrt{1-\gamma^2}}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (*)$$

где $\gamma = v_{s0}/v_{p0}$. Значения этих частот зависят только от параметров слоя.

Кривые амплитудных спектров (см. рис. 1 б, з), вычисленные по результирующим сейсмограммам компонент полного поля (для точек вертикального профиля наблюдения при горизонтальном удалении от источника $r = 1.6$ км), дают локальные экстремумы на частоте ~ 46.2 Гц. Это значение как раз совпадает с резонансной частотой первой Кг-моды, вычисляемой по формуле (*) при $n = 1$. Глобальный (пологий) максимум амплитудных спектров в области низких частот (5–40 Гц) связан с влиянием рэлеевской волны, а также, по-видимому, с полем пластинчатой волны.

Обратимся теперь к модели М-2, в которой верхнее полупространство заполнено водой. Параметры слоя и нижнего полупространства имеют те же значения, что и в модели М-1-НС. Источник находится внутри слоя, а точки наблюдения располагаются по глубине как в слое, так и в полупространствах. В этой модели также формируется поле волны типа Кг, обладающее такими же свойствами, как в М-1. Проявление свойств этой волны, так же как в М-1, более явно выражено на горизонтальной компоненте поля (рис. 3). В отличие от случая модели М-1 за полем волны типа Кг вместо рэлеевской волны в упругой среде распространяется (рис. 3 а, в) особый тип стонлеевской поверхностной волны, генерируемой в слое распространением в жидком полупространстве продольной волны [10]. Эта поверхностная волна быстро затухает с глубиной и распространяется вдоль слоя со скоростью волны в жидком полупространстве. Как и в модели М-1, максимумы интенсивности поля волны типа Кг достигаются внутри слоя на глубинах $z \rightarrow 0$ и $z \rightarrow h$. Вне слоя слабое преломленное поле от Кг-волны (в обоих полупространствах) расщепляется на две составляющие и быстро затухает по мере удаления от границы (рис. 3 а, б). На кривых амплитудного спектра, как и в случае модели М-1, выделяются резонансные экстремумы на частоте 46 Гц (рис. 3 в).

Для иллюстрации «родственности» волн типа Кг, образующимся в моделях сред М-1 и М-2, волнам Сг, формирующимся в моделях М-0-1 и М-0-2, для последних моделей на рис. 4 и 5 соответственно приводятся результаты вычислений компонент полного поля и его амплитудных спектров. Упругие свойства слоя в моделях М-0-1 и М-0-2 заданы близкими к параметрам льда ($v_{p0} = 3100$ м/с, $v_{s0} = 1430$ м/с, $\rho_0 = 0.92$ г/см³), а у жидкого полупространства — параметрам воды. Для модели М-0-1 толщина слоя $h = 50$ м, резонансная частота $f_{C\tau} \approx 32.8$ Гц, что хорошо согласуется с расчетными кривыми амплитудных спектров. В модели М-0-2 мощность слоя задана $h = 20$ м и поэтому $f_{C\tau} \approx 81$ Гц.

Наиболее многообразной и интересной для практики является модель слоя (М-3), зажатого между упругими полупространствами. Отметим, что ранее в работе [7] уже проводились некоторые асимптотические вычисления поля типа Кг для моделей, аналогичным М-3, и исследовалось затухание поля этой волны в высокочастотной области в зависимости от удаления источника и спектрального состава импульса в источнике.

В наших исследованиях рассматривались различные варианты модели М-3, в частности симметричные модели низкоскоростного (М-3-НС) и высокоскоростного

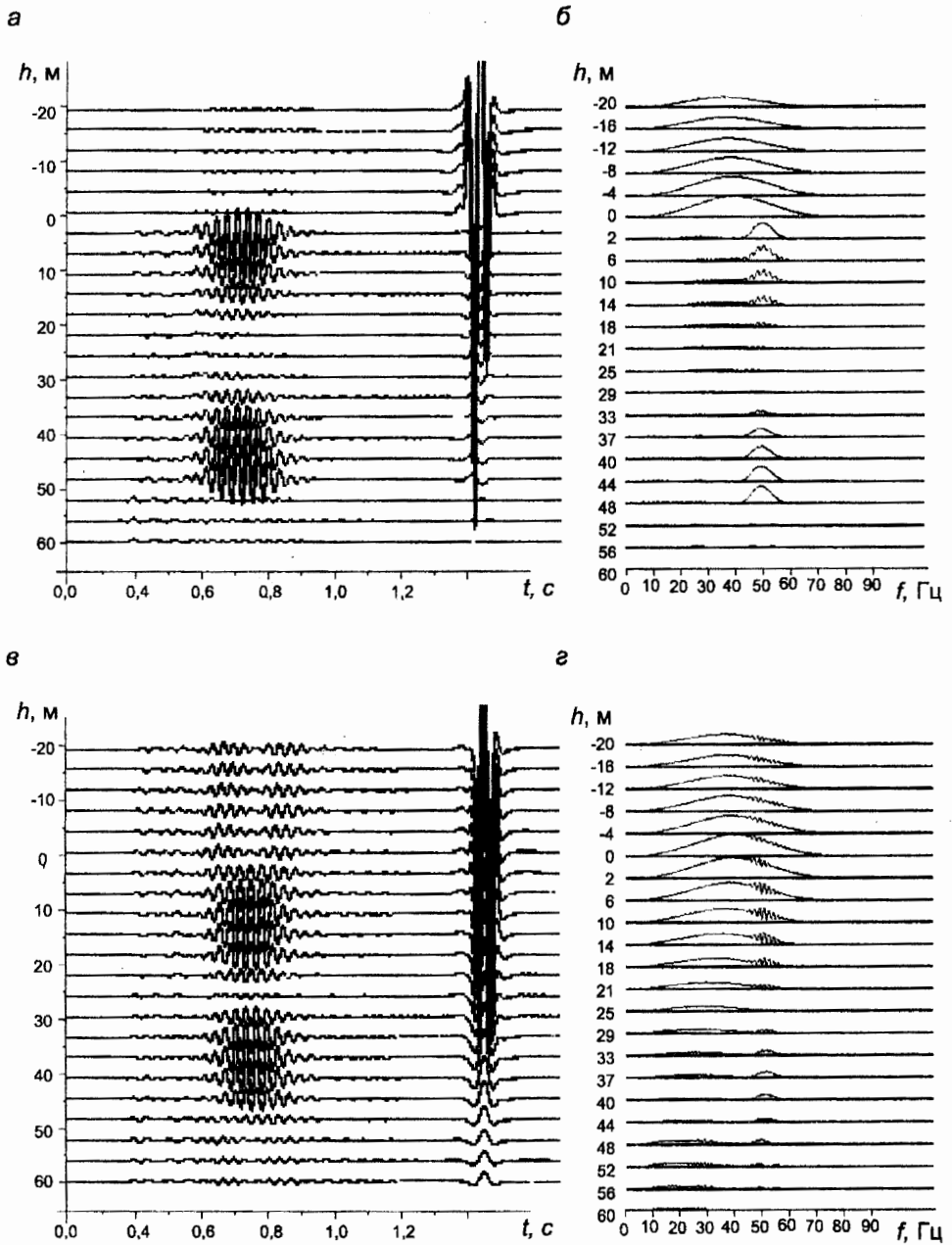


Рис. 3. Сейсмограммы горизонтальной (*a*) и вертикальной (*в*) компонент и соответствующие им кривые амплитудных спектров радиальной (*б*) и вертикальной (*г*) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-2;
 $h = 50$ м; $r = 1100$ м; $z_a = 5$ м

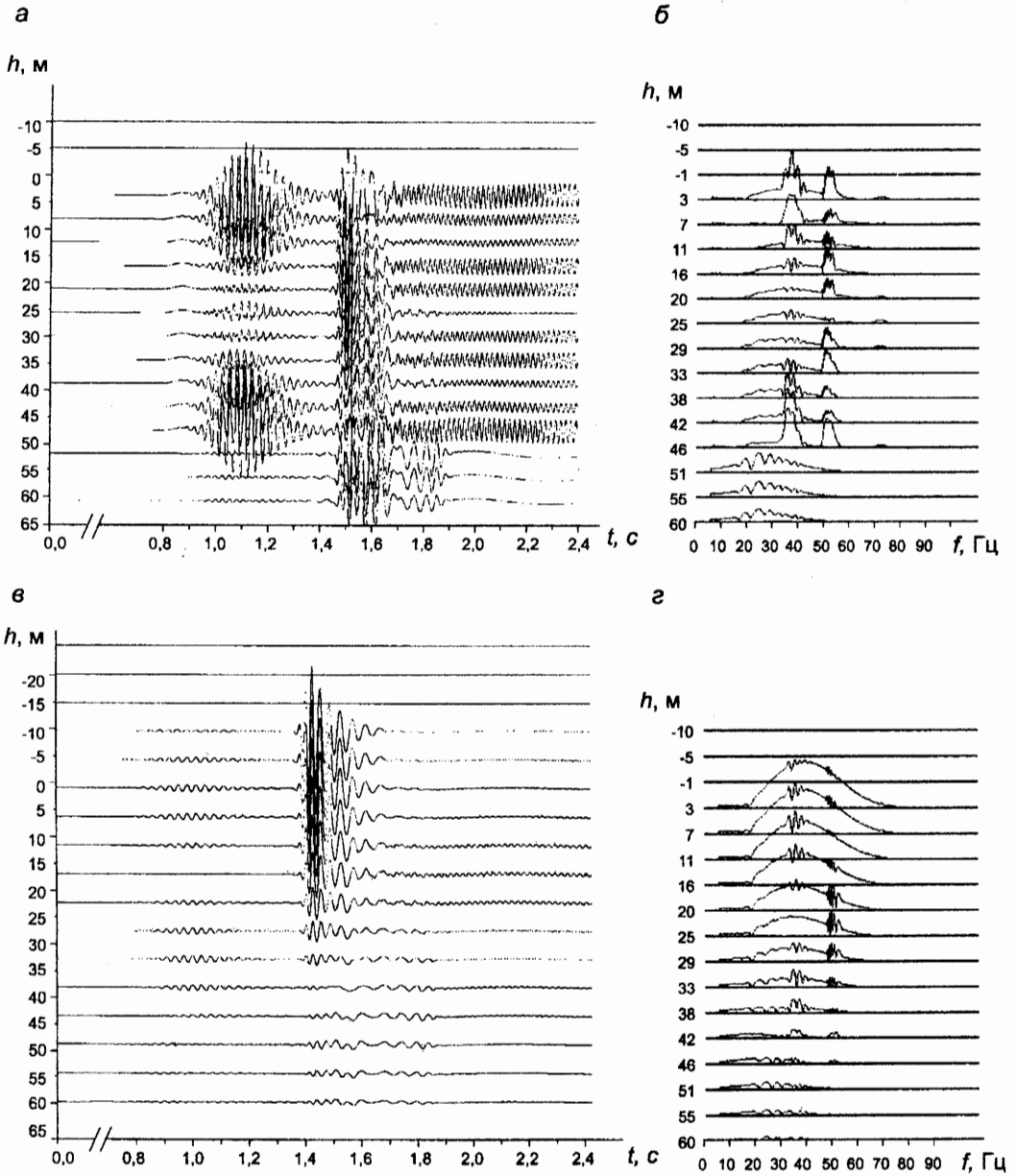


Рис. 4. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров радиальной (а), (б) и вертикальной (в), (г) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-0-1. Мощность слоя $h = 50$ м; удаление от источника $r = 2000$ м; источник на глубине $z_s = 5$ м

(М-3-BC) упругого слоя, зажатого между двух одинаковых упругих полупространств, а также моделей переходного слоя (М-3-ПС) и неконтрастного слоя (М-3-НК). Дополнительно рассматривались модели, в которых слой представлен упруго-пористой флюи-

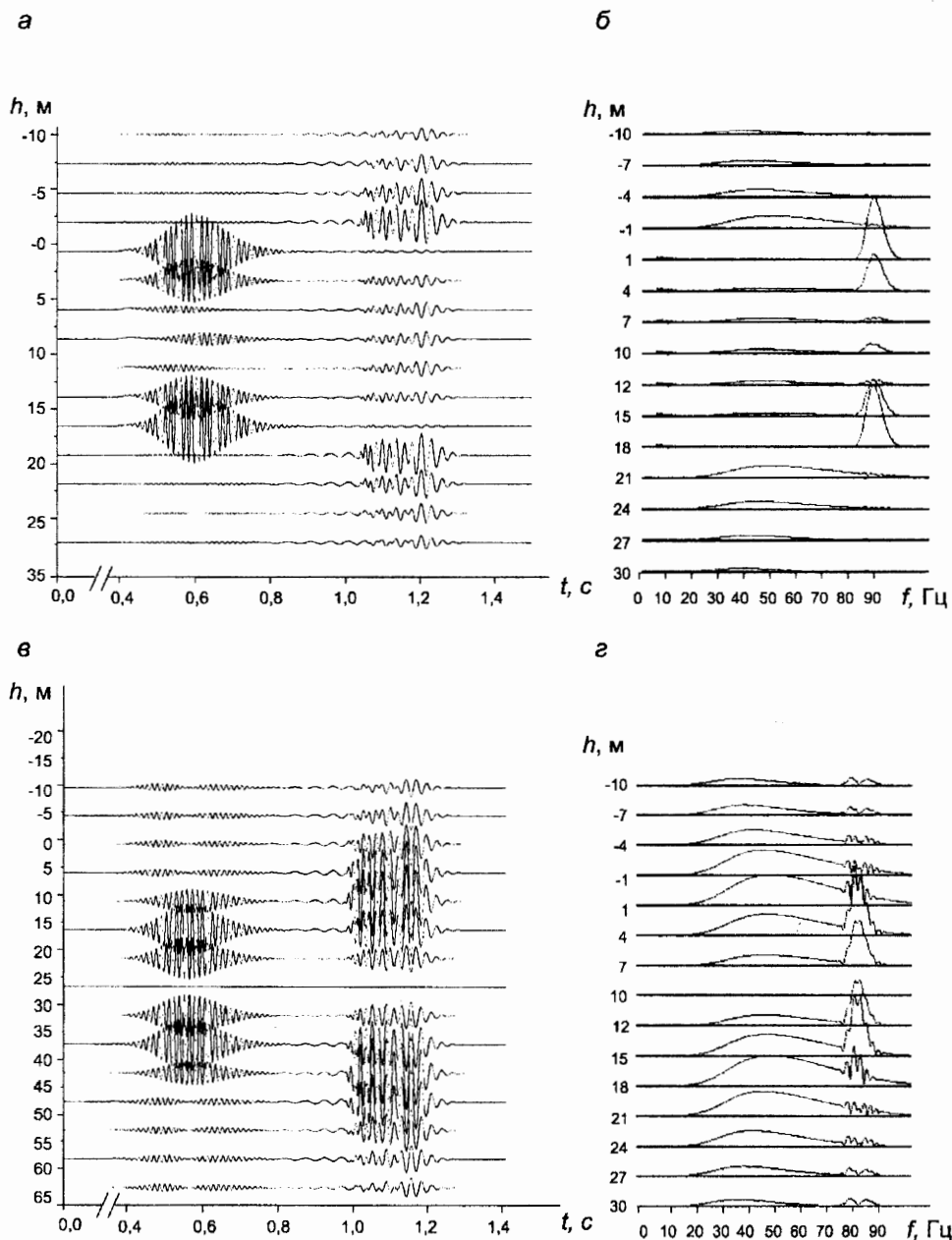


Рис. 5. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров радиальной (а), (б) и вертикальной (в), (г) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-0-2. Мощность слоя $h = 20$ м; удаление от источника $r = 1000$ м; источник на глубине $z_s = 10$ м

донасыщенной средой, описываемой теорией Био, а полупространства — чисто-упругие. На границах слоя в перечисленных вариантах моделей задавались условия скользяще-

го контакта. Кроме того, для сравнения проводились расчеты поля для аналогичных моделей, но при условиях жесткого контакта на границах. Источник задавался внутри слоя вблизи границы или на срединной плоскости.

В случае модели М-3-НС с пониженной скоростью в слое ($v_{p0} = 4000$ м/с, $v_{s0} = 2000$ м/с, $\rho_0 = 2.5$ г/см³, $h = 50$ м для слоя и соответственно $v_{p\nu} = 5000$ м/с, $v_{s\nu} = 2500$ м/с, $\rho_\nu = 3.0$ г/см³ для полупространств $\nu = 1, 2$) поле волны типа Кг (см. рис. 4 а, в) в целом проявляет те же свойства, что и в двух предыдущих моделях. На горизонтальной компоненте эта волна превосходит по интенсивности другие типы волн. На вертикальной компоненте максимум поля волны типа Кг достигается в интервалах глубин между границами слоя и его средней плоскости. Амплитудный спектр волнового поля внутри слоя, как и в предыдущих моделях, содержит локальные экстремумы на частотах ~ 46.2 и ~ 92.5 Гц, связанные с полем первых двух Кг-мод (рис. 6 б, г). Отметим, что второй экстремум выделяется только в случае, когда при расчете результирующей сейсмограммы использовался импульс с доминантной частотой 70 Гц.

При условии жесткого контакта на границах (вариант модели М-3-НС-Ж) внутри слоя наблюдается распространение только двух интерференционных полей со скоростями, близкими к скоростям продольных (~ 5000 м/с) и поперечных (~ 2500 м/с) волн в полупространствах (рис. 7). Эти поля, по-видимому, можно отнести к типу интерференционных головных волн. Амплитудный спектр волнового поля не содержит резонансных экстремумов.

В случае модели неконтрастного слоя М-3-НК (с одинаковыми параметрами слоя и полупространств $v_p = 4000$ м/с, $v_s = 2000$ м/с, $\rho = 2.5$ г/см³) в составе волнового поля выделяется три типа волн. Волновой пакет со свойствами моды типа Кг наблюдается непосредственно за полем прямой продольной волны, которое более интенсивно на горизонтальной компоненте (рис. 8). На вертикальной компоненте более интенсивным оказывается поле поверхностной стонлеевской волны. В амплитудном спектре по-прежнему выделяются экстремумы, связанные с волной типа Кг.

В случае модели М-3-ВС ($v_{p0} = 5000$ м/с, $v_{s0} = 2500$ м/с, $\rho_0 = 3.0$ г/см³ для слоя и, соответственно, $v_{p\nu} = 4000$ м/с, $v_{s\nu} = 2000$ м/с, $\rho_\nu = 2.5$ г/см³ для полупространств $\nu = 1, 2$) состав волнового поля внутри слоя обедняется. В частности, при мощности слоя $h = 20$ м поле волны типа Кг не обнаруживается. Выделяются в основном только три типа волн, из которых две волны имеют скорости, близкие к скоростям продольных волн в слое и полупространствах (~ 5000 и ~ 4000 м/с) соответственно, и у последней — скорость поперечной волны в полупространствах (~ 2000 м/с). Однако в случае толщины слоя $h = 50$ м волны типа Кг снова наблюдаются на сейсмограммах (рис. 9), проявляя описанные ранее свойства, за исключением того, что резонансная частота $f = 57$ Гц. При мощности слоя $h = 20$ м имеем $f_{n=1}^{(Kr)} \approx 144$ Гц. Такое относительно высокое значение $f_{n=1}^{(Kr)}$ обуславливает отсутствие поля типа Кг в результирующей сейсмограмме в случае ее вычисления в низкочастотной области (т. е. при низкочастотном импульсе в источнике).

В случае модели М-3-ПС упругие параметры переходного слоя принимают промежуточные средние значения ($v_{p0} = 4000$ м/с, $v_{s0} = 2000$ м/с, $\rho_0 = 2.5$ г/см³) между соответствующими значениями верхнего ($v_{p1} = 3000$ м/с, $v_{s1} = 1500$ м/с, $\rho_1 = 2.0$ г/см³) и нижнего ($v_{p2} = 5000$ м/с, $v_{s2} = 2500$ м/с, $\rho_2 = 3.0$ г/см³) полупространств. В сейсмическом поле, отвечающем модели М-3-ПС, внутри слоя обнаруживается пять типов

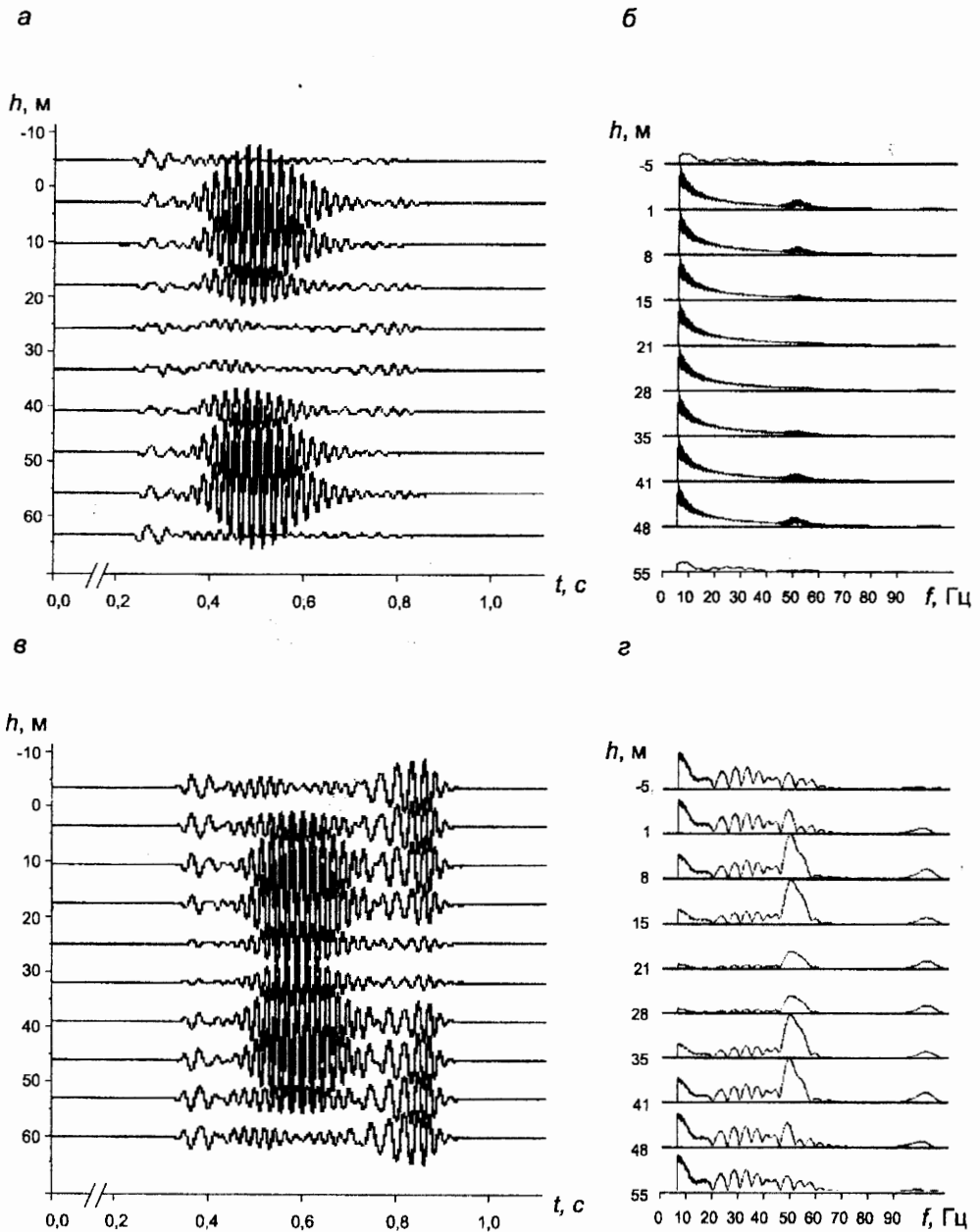


Рис. 6. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров горизонтальной (*a*), (*б*) и вертикальной (*в*), (*г*) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-3-НС; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_s = 25$ м

волновых образований (со скоростями $\sim 5000, 3600, 3000, 2500, 1500$ м/с) (рис. 10). Как и в модели М-3-НС, здесь (рис. 10 *a*, *в*) наблюдается интерференционное поле со свой-

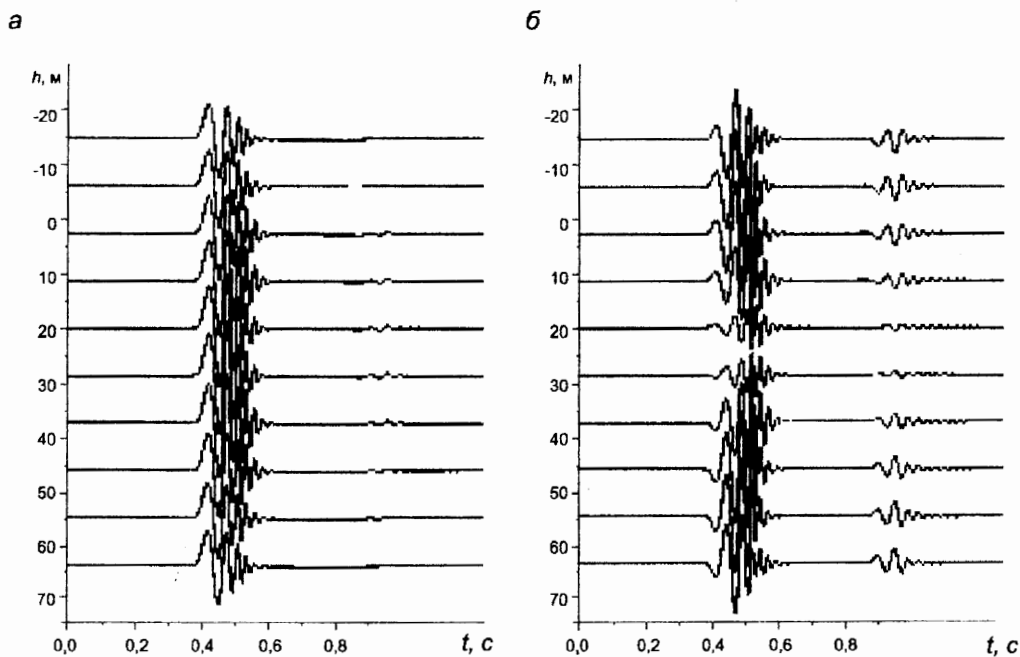


Рис. 7. Сейсмограммы горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-3-НС-Ж; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_s = 5$ м

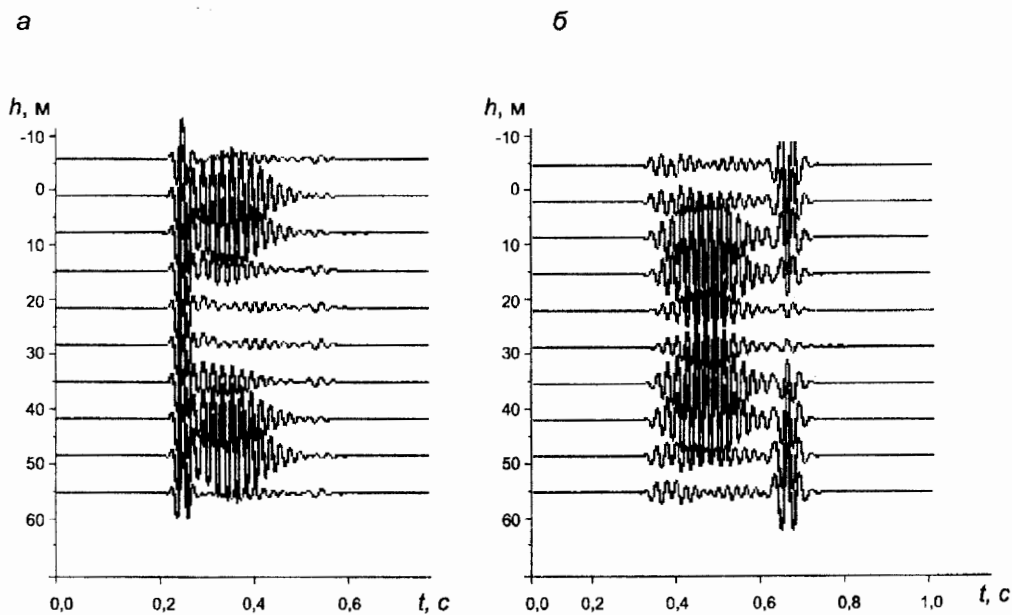


Рис. 8. Сейсмограммы горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-3-НК; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_s = 5$ м

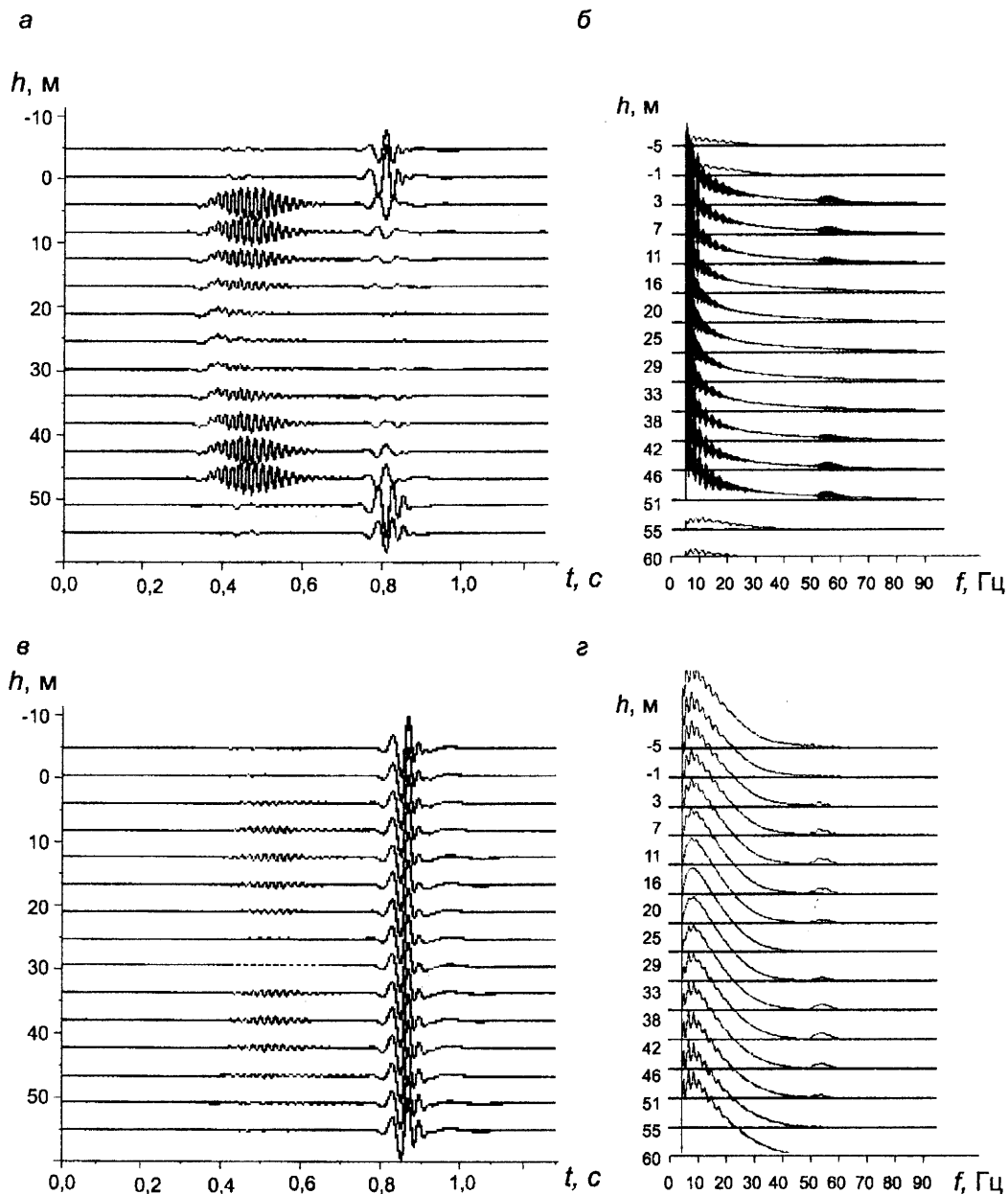


Рис. 9. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров горизонтальной (а), (б) и вертикальной (в), (г) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-3-ВС; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_s = 5$ м

ствами волны типа Кг и с значением групповой скорости ~ 2700 м/с. На кривых амплитудных спектров (рис. 10 б, г) выделяются уже знакомые экстремумы на частотах 46 и

92 Гц, связанные с волной типа Кг. Кроме того, на этих кривых обнаруживается локальный максимум на частоте 66 Гц, который, по-видимому, связан со слабым интерференционным полем, распространяющимся в средней части слоя. При меньшей мощности слоя, например $h = 20$ м, волна типа Кг практически не выделяется на сейсмограммах.

И, наконец, обратимся к случаю симметричной модели (М-3-ПБ) пористого насыщенного водой слоя, зажатого между двух чисто-упругих полупространств, с условиями проскальзывания на границах. В некоторых простейших случаях такая модель может быть полезна для описания флюидонасыщенного коллектора [1].

Параметры модели М-3-ПБ отличны от ранее используемых. В частности, в случае варианта модели М-3-НС-ПБ для характеристики слоя задавались следующие величины: модуль всестороннего сжатия флюида (воды) $K_f = 2.25$ ГПа, модуль всестороннего сжатия зерен материала каркаса $K_r = 37.9$ ГПа, модуль всестороннего сжатия осушенного каркаса $K_m = 12.92$ ГПа, модуль сдвига осушенного каркаса $\mu_m = 6.02$ ГПа, плотность флюида $\rho_f = 1$ г/см³, плотность твердого каркаса $\rho_s = 2.75$ г/см³, коэффициент пористости $\phi = 0.23$, проницаемость $k = 2.5 \cdot 10^{-15}$ м², вязкость флюида $\eta = 0,001$ кг/(м·с). При таких параметрах слоя скорости поперечной и быстрой продольной волн на частоте 40 Гц составляют $v_s \approx 1600$ м/с, $v_{fp} \approx 3250$ м/с. Для полупространств $\nu = 1,2$ задавались параметры $v_{p\nu} = 4000$ м/с, $v_{s\nu} = 2000$ м/с, $\rho_\nu = 2.5$ г/см³.

При мощности слоя $h = 50$ м в структуре волнового поля (рис. 11 а, в) помимо волн типа Кг появляются новые интерференционные волнообразования, однако, в целом наблюдается сходство с полем в модели М-3-НС. Кривые амплитудных спектров (рис. 11 б, г) при мощности слоя $h = 50$ м содержат несколько резонансных экстремумов, связанных как с волной типа Кг, так и с другой более низкоскоростной интерференционной модой. Расчеты по формуле (*) при $h = 50$ м дают $f_{n=1}^{(Kr)} \approx 36.5$ Гц для частоты первой моды Кг, а при $h = 20$ м — $f_{n=1}^{(Kr)} \approx 91$ Гц. Последнее сказывается в том, что при мощности слоя $h = 20$ м интенсивность поля типа Кг оказывается значительно слабее, чем в случае $h = 50$ м. Эти результаты хорошо согласуются с данными моделирования для пористого пласта, причем в случае мощности слоя $h = 50$ м на кривых модельных спектров удается выделить также экстремумы, отвечающие модам с номерами $n = 2,3$ (рис. 11 б, г).

Как уже отмечалось, моды Кг генерируются в слое только при расположении источника внутри слоя; в противном случае волны типа Кг не возбуждаются. Это, в частности, подтверждается результатами вычисления волнового поля для симметричной модели слабоконтрастной среды М-3-НС₀ ($h = 20$ м, $v_{p0} = 1,75$ км/с, $v_{s0} = 0.9$ км/с, $\rho_0 = 1.9$ г/см³ для слоя и $v_{p\nu} = 2.2$ км/с, $v_{s\nu} = 1,1$ км/с, $\rho_\nu = 2.0$ г/см³ для полупространств $\nu = 1.2$) в случае расположения источника над кровлей слоя ($z_s = -5$ м), а приемников — внутри слоя (рис. 12). Очевидно, что поле волн типа Кг не будет также регистрироваться при расположении приемников вне слоя, а источника — внутри слоя.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Волновое поле, возбуждаемое сосредоточенным источником внутри упругого слоя, имеющего на границах контакт с проскальзыванием, имеет более сложный волновой состав по сравнению с случаем жесткого контакта на границах. В частности, показано, что в рассматриваемых в работе моделях сред (М-1, М-2, М-3), имеющих контакт про-

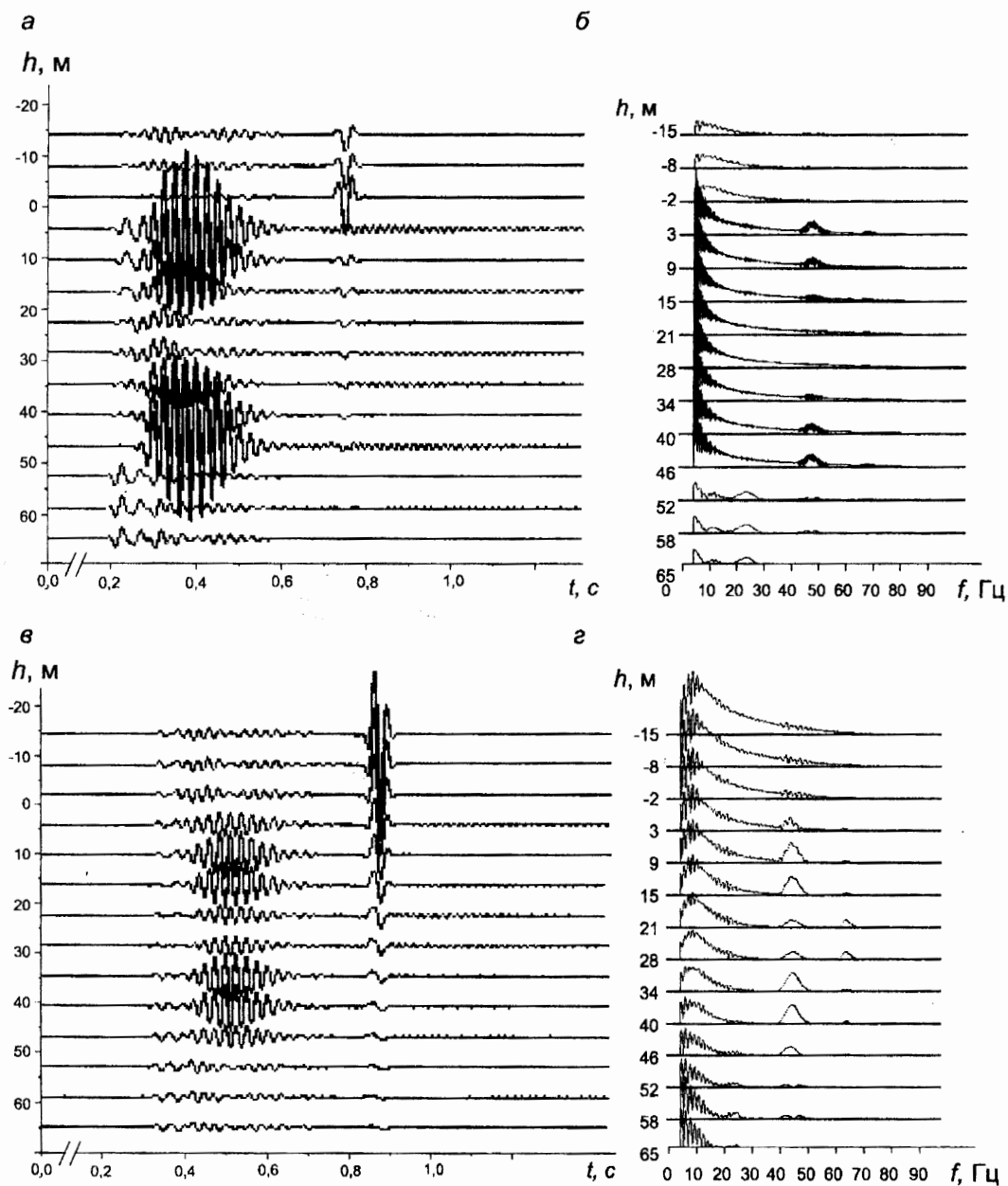


Рис. 10. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров горизонтальной (*a*), (*б*) и вертикальной (*в*), (*г*) компонент поля вертикального профиля наблюдения в случае модели М-3-ПС; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_s = 5$ м

скальзывания на границе с упругим полупространством, внутри слоя могут регистрироваться интерференционные моды типа Кг-волны (теоретически описанные в работах

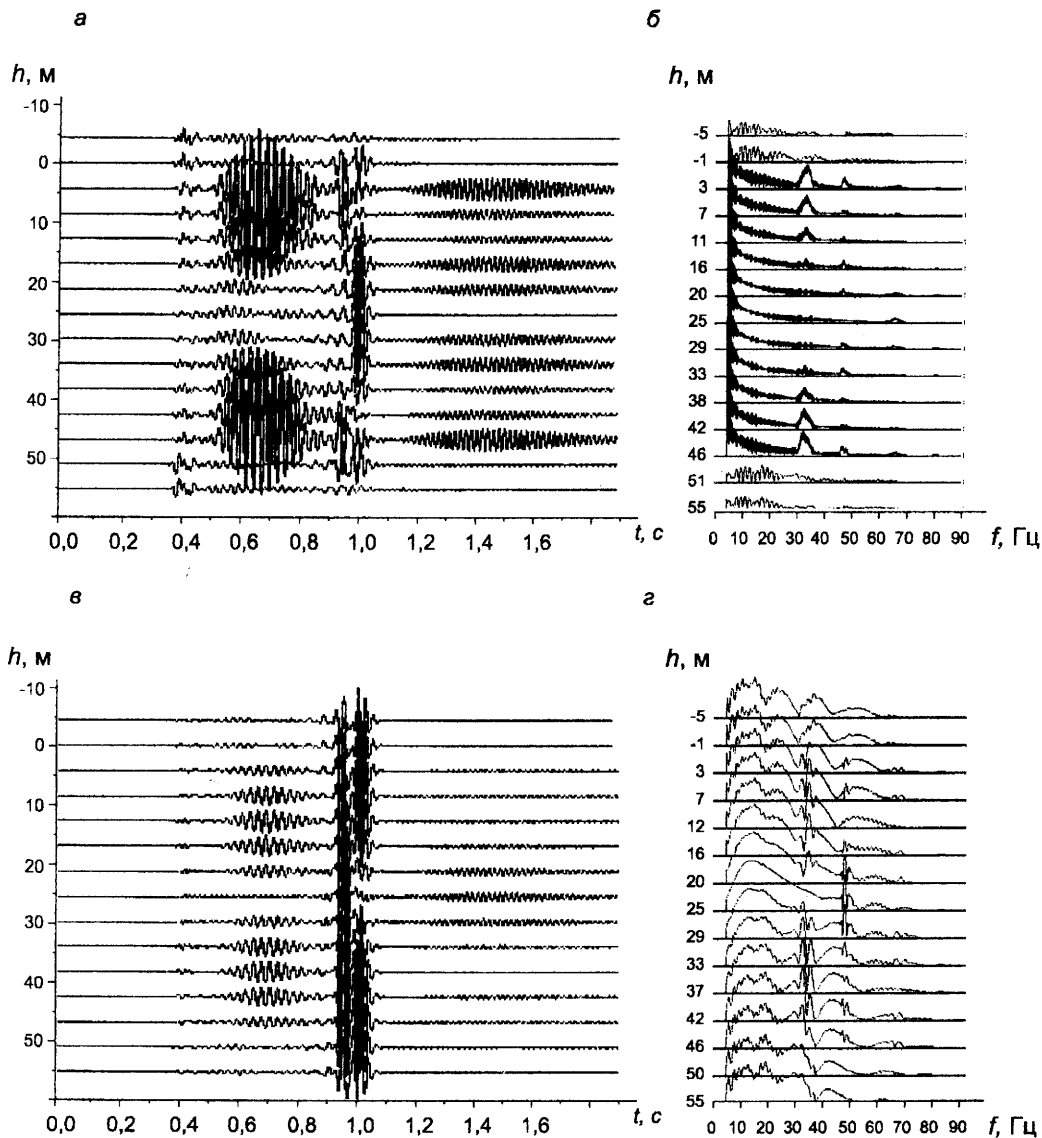


Рис. 11. Сейсмограммы и соответствующие им кривые амплитудных спектров горизонтальной (а), (б) и вертикальной (в), (г) компонент поля вертикального профиля наблюдения для модели М-3-ПБ; $h = 50$ м; $r = 1600$ м; $z_g = 5$ м

П. В. Крауклиса), подобные Сг-волнам. Аналогичные поля возбуждаются также и в пороупругом слое (среда Био), имеющем на границах соответствующие условия проскальзывания. Волны типа Кг обладают резонансным характером амплитудного спектра. Вблизи границ слоя волна Кг имеет (на горизонтальной компоненте) наибольшую интенсивность и продольный тип поляризации. С увеличением глубины до средней ча-

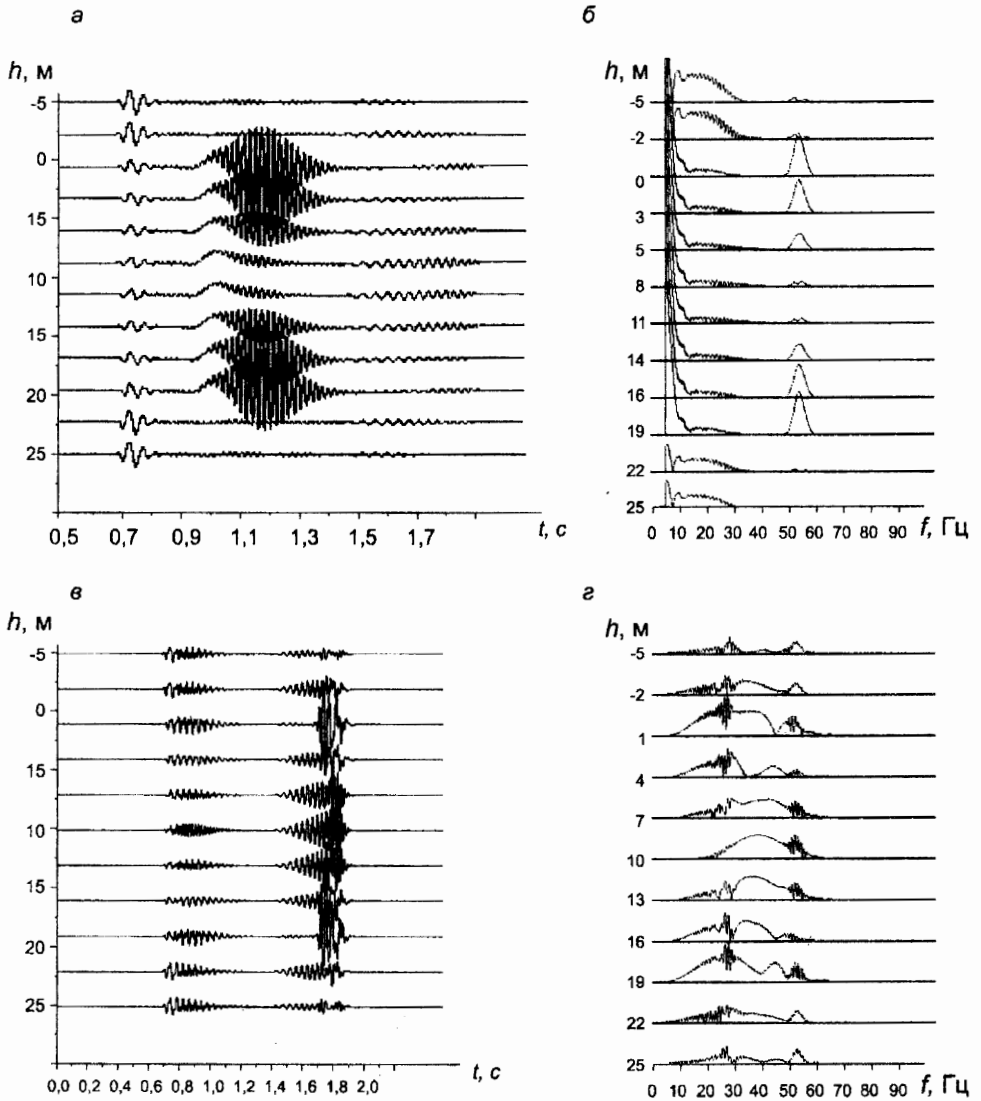


Рис. 12. Сейсмограммы и кривые амплитудных спектров горизонтальной компоненты поля вертикального профиля наблюдения в случае модели М-3-НС₀; $h = 20$ м; $r = 1600$ м для двух положений источника: *а*, *б* — $r_s = 10$ м; *в*, *г* — $z_s = -5$ м

сти слоя интенсивность поля Кг-волны ослабевает, и при этом характер поляризации постепенно меняется на поперечный.

Волны типа Кг могут иметь доминирующую интенсивность по отношению к другим типам распространяющихся в слое волн. Однако эти волны в условиях плоско-параллельного залегания слоев недоступны для обнаружения наземной сейсмикой и могут быть использованы в основном при схемах наблюдения подобных межскважинному

просвечиванию. В частности, возбуждение поля типа Кг может служить индикатором распознавания флюидонасыщенного пористого слоя, у которого условия проскальзывания на границах физически могут выражаться в существовании очень тонкого жидкого прослоя на стенках коллектора. При уменьшении мощности слоя увеличивается резонансная частота Кг-мод, вследствие этого поле Кг-волн может не наблюдаться в низкочастотной полосе приема. В свою очередь, ослабление интенсивности волны типа Кг или ее пропадание (в фиксированной низкочастотной области) может свидетельствовать об уменьшении мощности слоя или же об изменении условий контакта на его границах.

Указатель литературы

1. Голикова Г. В., Ковтун А. А., Решетников В. В. Численные исследования интерференционных волновых полей в слоистых средах, содержащих границы разделов с контактом проскальзывания // Вопросы геофизики. Вып. 39. СПб: Изд-во СПбГУ, 2006. С. 20–37.
2. Краужлис П. В., Краужлис Л. А. К задаче отражения и преломления волн на нежесткой границе раздела // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., 1990. Вып. 30. С. 96–103.
3. Краужлис П. В., Краужлис Л. А. Об одном типе волн в средах, содержащих поверхности ослабленного механического контакта // Математические вопросы теории распространения волн: Записки научных семинаров ЛОМИ. 1988. Т. 173. С. 113–122.
4. Ewing W. M., Jardetzky W. S. Elastic Waves in Layered Media. New York. 1957. 380 p.
5. Cray A. P. Seismic studies on Fletcher's ice island // T-3. EOS, Trans. Am. Geophys. Union, 35. 1954. P. 293–300.
6. Краужлис П. В., Краужлис Л. А. О влиянии границ разрыва в среде на интерференционные волны // Математические вопросы теории распространения волн: Записки научных семинаров ЛОМИ. 1989. Т. 19. С. 110–115.
7. Краужлис П. В., Краужлис В. П. Затухающие моды в слое, находящемся в трещиноватой среде // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. 29. Л., 1989. С. 30–35.
8. Краужлис П. В., Краужлис А. П. // EAGE 68th Conference & Exhibition — Vienna, Austria, 12–15 June 2006.
9. Schmidt H. OASES Version 3.1. User Guide and Reference Manual // Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology. February 20, 2004.
10. Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. М.: Наука. 1973. 343 с.