АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 5, с. 645–651

УДК 550.341+550.834+621.319

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ МОРСКОГО ДНА

© 2005 г. Ю. М. Заславский, Б. В. Кержаков, В. В. Кулинич

Институт прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 12.05.04 г.

Проведено численное моделирование сейсмоакустического поля в диапазоне частот ниже 100 Гц, создаваемого в жидкости и в слоистой донной среде импульсным гидроакустическим ненаправленным источником, расположенным вблизи морского дна на мелководной акватории. Определены основные типы возбуждаемых и рассеянных волн, которые на плоскости дистанция – время прихода представлены соответствующими годографами. Показана возможность решения некоторых задач акустической томографии дна, в частности, определения мощности придонных осадочных слоев и скоростей распространяющихся в них продольных и поперечных волн. Путем вариации параметров упругости слоистой модели проанализированы характерные изменения в волновом поле и установлена возможность прогноза нефтесодержащих слоев в донной среде.

Проблема сейсмического профилирования дна в шельфовой зоне океана представляет значительный интерес для решения задач акустики океана, в частности, акустики донной толщи, включающей проблему поиска и разведки месторождений углеводородных залежей. Несмотря на то, что исследования этой проблемы ведутся, начиная со второй половины прошлого столетия, интенсивность научно-технических разработок к настоящему времени не снижается. Большое внимание уделяется как экспериментальным и техническим аспектам, так и теоретическим вопросам, о чем свидетельствуют многочисленные работы этого направления [см., например, 1–6]. Отметим, что при анализе упругих полей аналитическими методами возникают значительные трудности даже применительно к средам, представляющим собой плоскослоистые пространственные структуры, ввиду чрезвычайного усложнения вычислений с увеличением числа слоев. Современные средства численного моделирования позволяют преодолеть эти трудности и учесть большое разнообразие геологических и акустических характеристик морского дна, встречающихся в реальных условиях в различных районах океанского шельфа, при этом существенно превосходя возможности, достигаемые при проведении аналитических расчетов. Часто в качестве показателя или признака присутствия залежи на том или ином горизонте принимается отношение коэффициентов затухания поперечных и продольных волн, в частности, его резкое повышение. С другой стороны, признаком наличия флюидонасыщенных пластов может также служить резкая смена величины скорости распространения в них упругих волн. Наиболее подходящим методом, позволяющим измерить и контролировать групповые скорости импульсных сигналов, переносимых упругими и гидроакустическими волнами в донной среде и жидкости, является построение линий-годографов на плоскости "дальность – время прихода", устанавливающих соответствие всевозможным типам волн, возбуждаемых источником колебаний и принимаемых на антенну – линейную цепочку гидрофонов или донных геофонов.

Этот подход положен в основу представленного в настоящей работе численного моделирования и анализа волновых полей при импульсном режиме излучения гидроакустического источника в сейсморазведочном диапазоне частот. Результаты исследования сейсмоакустических полей в жидкости и донной среде выполнены на основе применения пакета программ OASES (2-Version), который также использовался в работе [7] при моделировании пространственной волновой структуры полей тональных источников излучения. В расчетах принята трехслойная структура дна, типичная для ряда мелководных акваторий, причем непосредственно за первым слоем осадков с очень низкой скоростью волн сдвига сразу следует второй донный слой с большей жесткостью и скоростью поперечных волн. Часто на горизонтах, соответствующих этому слою, располагаются пропластки пористой среды, содержащие углеводородный флюид, причем их наличие коррелирует с понижением среднего значения скорости поперечных волн в этой области. Поэтому цель работы состояла в анализе качественных изменений в характере волнового поля, изо-

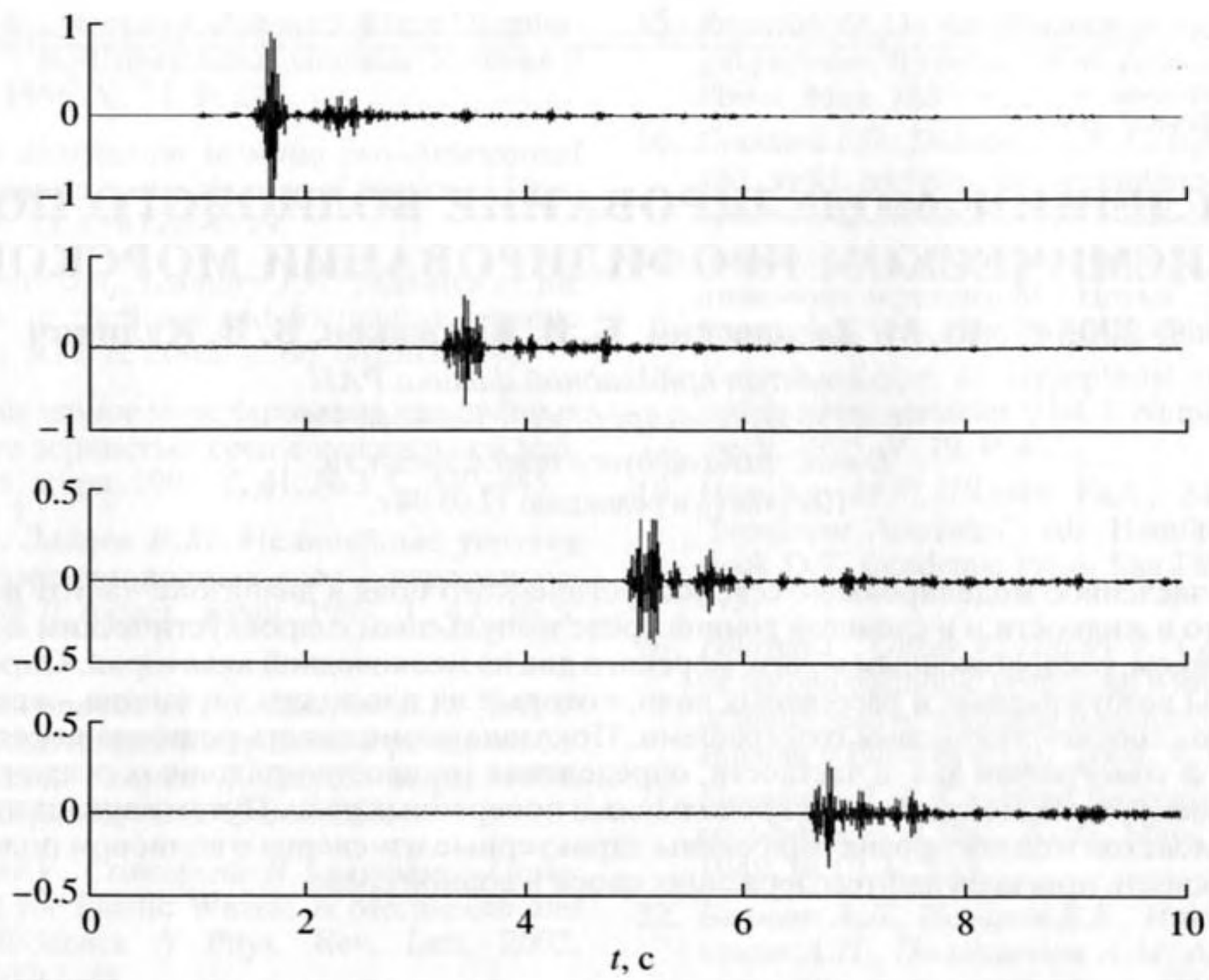

Рис. 1. Осциллограммы сигнала на дистанциях X = 2.5 км, 5 км, 7.5 км и 10 км и глубине 246 м. Скорость поперечных волн во втором слое $V_S^{(3)}$ = 1 км/с, несущая частота f = 30 Гц, ширина полосы Δf = 25 Гц.

бражаемого в виде линий-годографов на плоскости дальность – время прихода, возникающих при понижении значения скорости волн сдвига в области второго донного слоя.

Сейсмоакустическое поле для принятой модели рассчитывается вплоть до 10 км по дальности с дискретностью 50 м, до 1.5 км по глубине с дискретностью 6 м и в диапазоне частот от 5 Гц до 70 Гц с дискретностью 0.05 Гц, что позволяет моделировать распространение широкополосных импульсных сигналов с различной несущей частотой.

Расчетная модель слоистой структуры идентична ранее описанной в работе [7] и представляет собой подстилающее полупространство – кристаллический фундамент и три покрывающих слоя, включая верхний слой жидкости. Она задана следующими характеристиками: 1 – изоскоростной водный слой (h_1 = 250 м, ρ_1 = 1 г/см^3, $V_P^{(1)}$ = 1.5 км/с), 2 – первый донный слой – слой осадков (h_2 = 50 м, ρ_2 = 1.5 г/см^3, $V_P^{(2)}$ = 1.6 км/с, $V_S^{(2)}$ = 0.06 км/с, $\alpha_P^{(2)}$ = 0.05 дБ/м кГц, $\alpha_S^{(2)}$ = 0.5 дБ/м кГц), 3 – второй донный слой (h_3 = 300 м, ρ_3 = 2.1 г/см^3, $V_P^{(3)}$ = 2.5 км/с, I – $V_S^{(3)}$ = 1 км/с, II – $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с, III – $V_S^{(3)}$ = 0 км/с, $\alpha_P^{(3)}$ = 0.03 дБ/м кГц, $\alpha_S^{(3)}$ = 0.1 дБ/м кГц), 4 – жесткий фундамент (ρ_4 = 2.5 г/см^3, $V_P^{(4)}$ = 4 км/с, $V_S^{(4)}$ = 2.5 км/с, $\alpha_P^{(4)}$ = 0.02 дБ/м кГц, $\alpha_S^{(4)}$ = 0.1 дБ/м кГц). Здесь h – толщина слоя, ρ – плотность, V_P, V_S – скорость распространения продольных и поперечных волн, α_P и α_S – соответствующие коэффициенты затухания. Ввиду необходимости анализа влияния сдвиговой жесткости среды второго слоя на характеристики волнового поля, здесь представлены значения $V_S^{(3)}$ скорости поперечных волн в этом слое, соответствующие трем вариантам – (I, II, III).

При моделировании предполагается, что ненаправленный гидроакустический источник, имеющий малый волновой размер, располагается в воде в 1 м от дна, а принятые импульсные сигналы после согласованной фильтрации используются для дальнейшего построения сейсмограмм. На рис. 1 приведены нормированные импульсные отклики среды на глубине Z = 246 м при согласованной фильтрации акустического поля на дальностях X = 2.5 км, 5 км, 7.5 км и 10 км. Нормировка соответствует максимуму отклика, принятого на дистанции X = 2.5 км.

Полная совокупность подобных сейсмограмм делает возможным получить картину сейсмоакустического поля импульсного источника на плоскости "дальность – время прихода" и при извест-

ной глубине установки приемников фиксировать на ней линии годографов. Эта процедура позволяет идентифицировать различные типы волн, а по ним судить о слоистой структуре среды, в частности, о глубине залегания границ раздела и о скоростях продольных и поперечных волн, распространяющихся в донных слоях. Почернение картины передает уровень акустического давления p в жидкости и величину zz – компоненты тензора напряжений в каждой из трех областей, составляющих твердую структуру дна. За счет различия во времени прихода сигнала на приемники в полном волновом поле, в принципе, могут быть выделены поверхностные, каналовые (волны Лэмба), объемные – (продольные, поперечные) и нелучевые (например, головные – критически преломленные) типы волн, поскольку каждый волновой тип образует свою линию годографа или семейство линий.

На следующих рисунках по результатам численных расчетов на плоскости дальность – время прихода импульсов сформированы картины линий-годографов волн, распространяющихся во всей зондируемой области пространства на дистанциях X до 10 км и отраженных к приемникам. Результаты моделирования поля соответствуют случаю излучения тонально-импульсного сигнала с несущей частотой $f = 30$ Гц, с шириной полосы частот $\Delta f = 25$ Гц (временное разрешение 0.04 с). Вначале обратимся к анализу результатов численных расчетов, выполненных при скорости поперечных волн во втором донном слое $V_S^{(3)} = 1$ км/с, и дадим их интерпретацию.

На рис. 2 представлен разрез акустического поля в 4 м над дном. Наиболее яркая полоса (стрелка *1*) представляет собой совокупность линий, образуемых приходом импульсов, распространяющихся со скоростями 1.5 и 1.6 км/с. Об этом свидетельствует тот факт, что их наложение приводит к периодической модуляции всей яркой области, ширина которой с ростом дистанции несколько нарастает. Усредненное почти по десятикилометровой трассе значение наклона всей совокупности линий соответствует скорости 1.5 км/с. Входящие в эту область линии (стрелки *2*) представляют собой гиперболы, отклоняющиеся от прямолинейного хода при приближении к эпицентральной точке $X = 0$ и выходящие на некоторые значения временных задержек Δt. Соответствующие гиперболическим годографам основная и реверберационные волны – это волны, отраженные от свободной водной поверхности, причем основная имеет при $X = 0$ задержку $\Delta t = 0.333$ с. Линии-годографы многократно отраженных волн, которые возникают вследствие реверберации, имеют такой же период повторения и время задержки, кратное этому значению. Присутствует также годограф волны-спутника, имеющий при $X = 0$ задержку $\Delta t = 0.07$ с относительно основной волны, откуда можно заключить, что эта волна есть дважды отраженная продольная волна – первый раз от свободной водной поверхности, а второй – от границы раздела первого и второго упругих донных слоев.

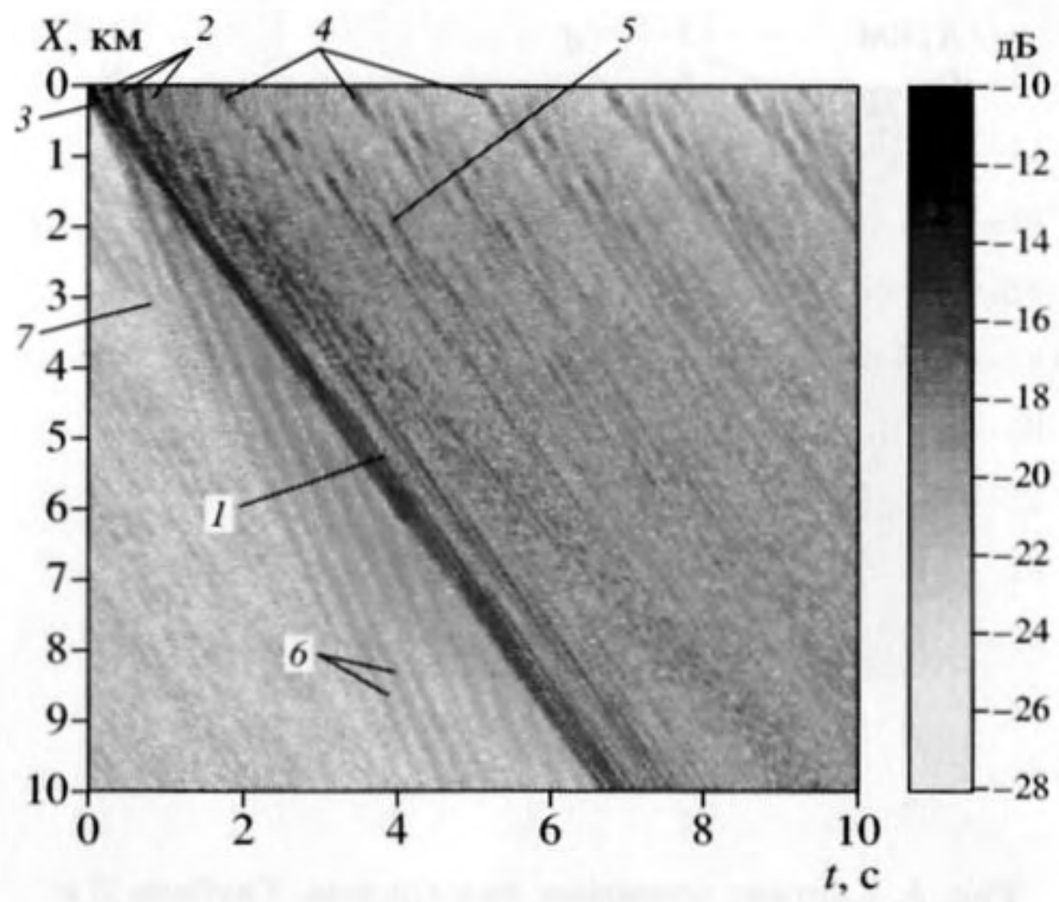

Рис. 2. Картина волновых годографов. Глубина $Z = 246$ м, скорость поперечных волн во втором донном слое $V_S^{(3)} = 1$ км/с.

На рассматриваемой плоскости вблизи начала координат имеется прямолинейный годограф волны, существующей лишь на дистанциях до 0.5 км и спадающей практически к нулю на удалении в 1 км от источника (стрелка *3*). Ему может соответствовать прямая волна, распространяющаяся в жидкости ($V_P^{(1)} = 1.5$ км/с) вблизи границы дно–жидкость.

Вблизи точки эпицентра $X = 0$, т.е. на незначительных удалениях от источника, но со значительным временем задержки $\Delta t = 1.7$ с и с таким же периодом повторения $T = \Delta t$, располагается семейство линий-годографов, соответствующих кратно отраженным волнам (стрелки *4*). Для объяснения причины их возникновения можно высказать предположение о многократном проникании гидроакустических лучей из жидкости в первый донный слой в виде поперечных волн и обратное возвращение этих волн после отражения от следующей границы. При переходе в жидкую среду вновь возникает их трансформация в гидроакустическую волну. Повторяемость такого процесса ведет к кратности волнового обмена на границе жидкость – дно, причем соответствующий период получается при учете принятой в расчетной модели аномально низкой скорости распространения поперечных волн $V_S^{(2)} = 60$ м/с по

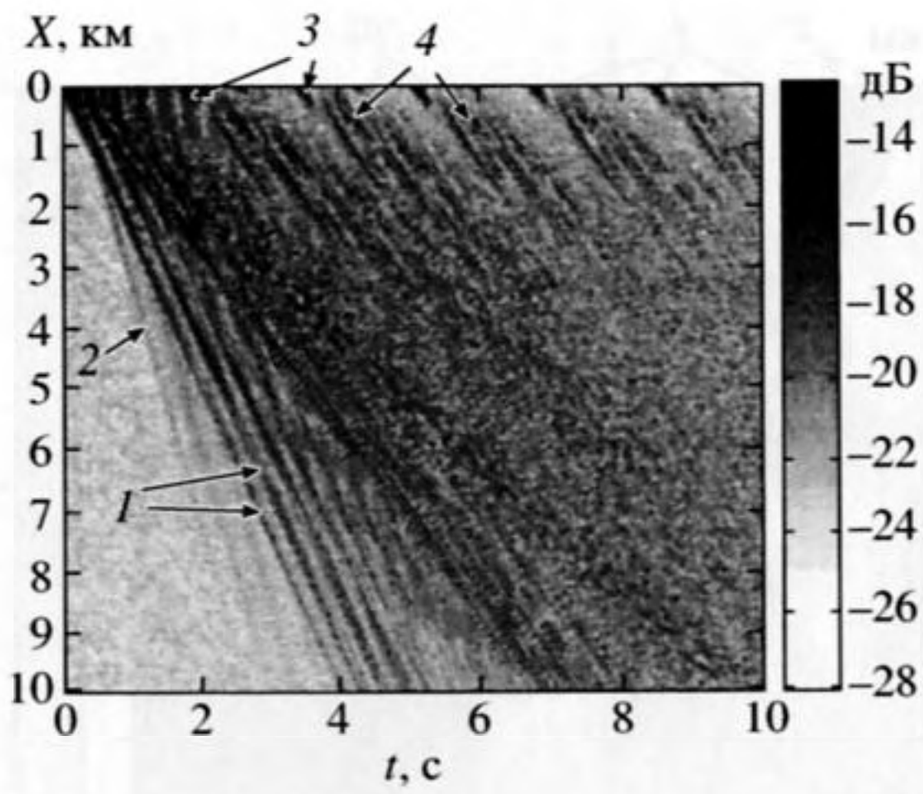

Рис. 3. Картина волновых годографов. Глубина Z = = 366 м, скорость поперечных волн во втором донном слое $V_S^{(3)}$ = 1 км/с.

сравнению со скоростями звука в жидкости $V_P^{(1)}$ = = 1.5 км/с, когда преломление идет под углом, близким к 90°. Заметим, что именно эти волны реверберации будут при зондировании создавать помеху регистрации волн, отраженных от глубоко лежащих границ и несущих информацию об этих границах.

Другое семейство параллельных годографов, присутствующих в картине на значительных временах задержки (стрелка *5*), имеет период повторения порядка T = 0.333 с, что может найти объяснение на основе привлечения уже упоминавшейся модели кратных отражений продольных волн в комбинации с только что рассмотренной возможностью многократных волновых обменов с первым донным слоем. Однако ход линий этого семейства не столь регулярен, как у представленных выше.

Имеются также годографы и более скоростных волн, чем только что рассмотренные. Они присутствуют на отрезках времени, предшествующих вступлению прямых и отраженных волн, бегущих в жидкости. К ним относятся головные волны сжатия, преломленные на границе первого и второго донных слоев и бегущие со скоростью $V_P^{(3)}$ = 2.5 км/с, которые на рассматриваемой плоскости также представлены системой многократно отраженных волн (стрелки *6*). На еще более ранних временах прихода, т.е. по еще более крутым годографам, могут быть обнаружены продольные многократно отраженные волны, распространяющиеся со скоростью $V_P^{(4)}$ = 4 км/с, преломленные на границе с фундаментом (стрелка *7*).

Обратимся к другой картине волнового поля на рис. 3, которая получена при регистрации сигналов системой датчиков, расположенных на глубине 366 м, т.е. во втором донном слое на глубине 66 м под границей с первым донным слоем. Волновое поле здесь представлено бóльшим числом волновых типов, чем в предыдущем случае, кроме того, лучше выделяются годографы высокоскоростных продольных волн ($V_P^{(3)}$, $V_P^{(4)}$), преломленных на границе раздела донных слоев (стрелки *1*, *2*).

На ближайших к источнику дистанциях, (0–300 м) можно обнаружить семейство линий-годографов, соответствующих продольным волнам-кратникам, бегущим со скоростью V ~ 1.5 км/с, время прихода которых кратно 1.7 с (стрелки *3*). Второе семейство линий, перемежающееся с первым, имеет относительно первого дополнительную задержку по времени прихода еще на 0.3 с и соответствует волнам, бегущим со скоростью V ~ ~ 1 км/с, причем последние существуют в некотором ограниченном интервале расстояний (0.5–0.9 км) от источника (стрелки *4* на рис. 3). Причина возникновения этих волн, по-видимому, такая же, как и в предыдущем случае.

Следовательно, как показывает численное моделирование волновых полей, представленных на рис. 2 и рис. 3, на основе использования данных, регистрируемых антенной гидрофонов, находящихся вблизи дна, могут быть определены скорости волн, распространяющихся в ближайших к донной границе слоях. Еще более полные и подробные данные получаются с использованием системы геофонов при их заглублении под границу жидкость – дно.

Далее для анализа влияния параметра сдвиговой жесткости второго донного слоя рассмотрим аналогичные расчетные данные волновой картины, соответствующие пониженному значению скорости $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с. На рис. 4 дается волновое поле, регистрируемое в жидкости гидроакустической антенной на глубине 246 м, которое является результатом численного моделирования при новых параметрах сдвиговой упругости среды в области второго слоя. По сравнению с рис. 2 в рассматриваемом случае можно видеть существенное перестроение картины на временах, превышающих время прихода гидроакустического импульса, рассеянного свободной водной поверхностью. Кроме яркой полосы, образуемой слабо разрешаемыми годографами волн со скоростью V ~ 1.5 км/с и V ~ 1.6 км/с (стрелка *1*), возникает более широкая область, в которой сосредоточе-

ны годографы гидроакустических волн, многократно отраженных от свободной морской поверхности, которые, вероятно, проникают и в первый донный слой и отражаются от границы первого и второго слоя (стрелка *2*). Импульсы этих волн по времени вступления запаздывают относительно первых из указанных гидроакустических импульсов, хотя по интенсивности почти не уступают им. На плоскости дальность – время на протяжении всей трассы приема, как и в прежнем случае, присутствуют продольные головные волны-кратники (стрелки *3* и *4*), многократно отраженные и преломленные на границе первого и второго донных слоев (со скоростью распространения $V \sim 2.5$ км/с), а также на границе второго донного слоя и фундамента (со скоростью $V \sim 4$ км/с), опережающие гидроакустические импульсы по времени прихода.

На рис. 5а применительно к тому же случаю пониженного значения сдвиговой упругости среды во втором слое представлена картина поля на глубине 366 м, т.е. на 66 м под границей с первым донным слоем. Можно видеть, что соответствующая картина на плоскости дальность – время задержки делится вдоль диагонали на две части. В нижней располагаются годографы продольных волн (стрелки *1*), кратно отраженных от границы с фундаментом (период кратности $T = 0.25$ с) и бегущих во втором слое со скоростью $V \sim 2.5$ км/с. Присутствуют также головные волны, распространяющиеся со скоростью $V \sim 4$ км/с, преломленные на указанной границе (стрелка *2*). В верхней части располагаются годографы продольных волн (стрелка *3*), рассеянных свободной морской поверхностью (период кратности $T = 0.4$ с).

Аналогично ранее рассмотренному случаю, в котором $V_S^{(3)} = 1$ км/с, на дистанциях до источника, не превышающих нескольких первых сотен метров, учитывая задержку в 2.5 с, можно обнаружить два семейства линий-годографов, которые даются на рис. 5б, представляющем укрупненное изображение волновой картины рис. 5а в интервале дистанций 0–2 км.

Стрелками *4* (рис. 5а, рис. 5б) помечены годографы многократно отраженных волн, имеющих скорость, более низкую, чем $V \sim 1.5$ км/с. Появление замедленной волны в сформированной волновой картине связано с отражением и преломлением волны во втором донном слое, в котором принято пониженное значение скорости поперечных волн. Стрелками *5* (рис. 5а, рис. 5б) помечены годографы этих волн, бегущих со скоростью $V \sim 1.6$ км/с, соответствующих продольным волнам, преломленным на границе первый донный слой – жидкость.

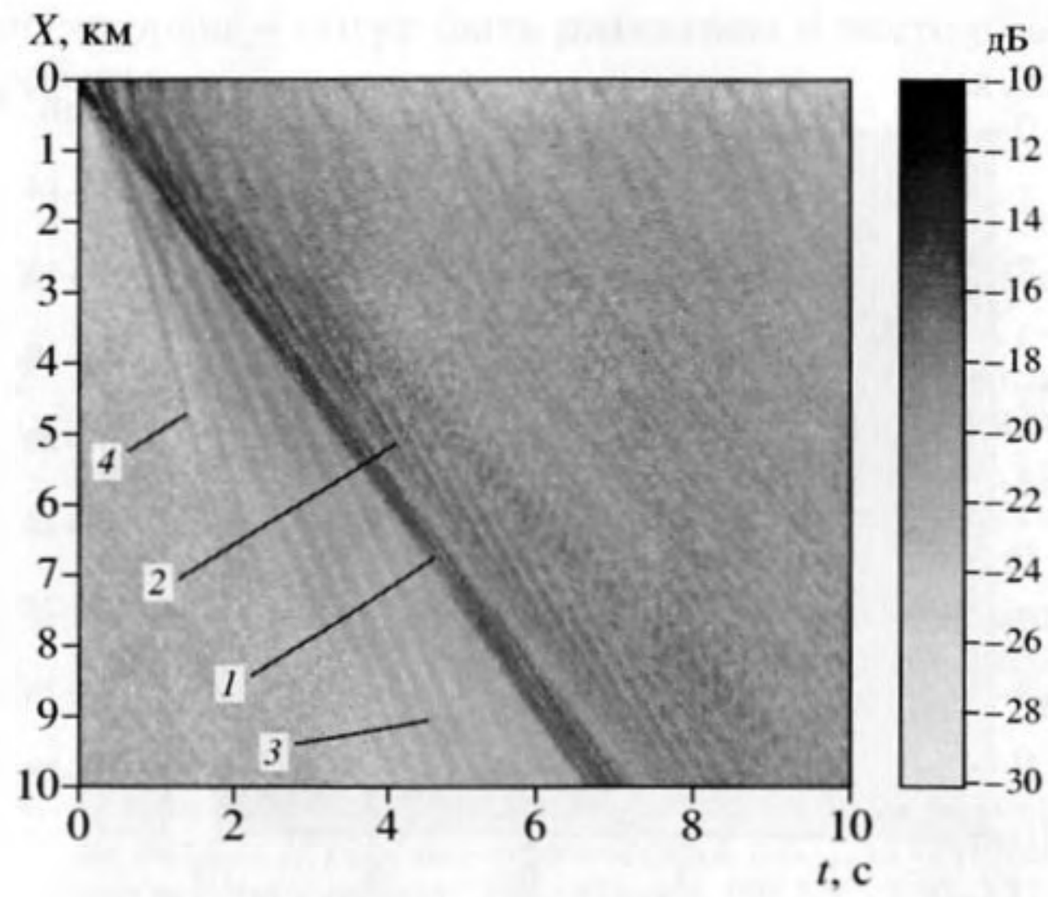

Рис. 4. Картина волновых годографов. Глубина $Z = 246$ м, скорость поперечных волн во втором донном слое $V_S^{(3)} = 0.5$ км/с.

Таким образом, по представленным на рисунках данным моделирования волнового поля, соответствующего сейсмическому профилированию, нетрудно заключить, что для импульсного сигнала с принятой несущей частотой линии-годографы формируются в первую очередь отражением продольных волн от границ раздела, но в некоторых случаях в процессе формирования участвуют обменные волны, когда при прохождении через границы донных слоев продольные волны трансформируются в поперечные и наоборот. При этом наиболее информативные признаки о параметрах более глубоких слоев, недоступных для непосредственного прямого измерения, могут быть получены по наклону годографов волн максимальной интенсивности и по периодам кратности этих годографов. В реальном эксперименте эти характеристики будут рассматриваться как результаты предварительной обработки при решении так называемой обратной задачи – определения параметров и реконструкции структуры среды.

Из результатов численного моделирования вытекают некоторые итоги, указывающие на возможность прогноза флюидосодержащих включений в придонных слоях, одним из проявлений которых, по нашему предположению, является понижение сдвиговой жесткости среды в области второго слоя. В полной волновой картине, как показывает моделирование, такое понижение жесткости ведет к относительному увеличению уровня продольных волн, как отраженных, так и волн головных – преломленных под критическим углом. Вместе с этим происходит и снижение уровня

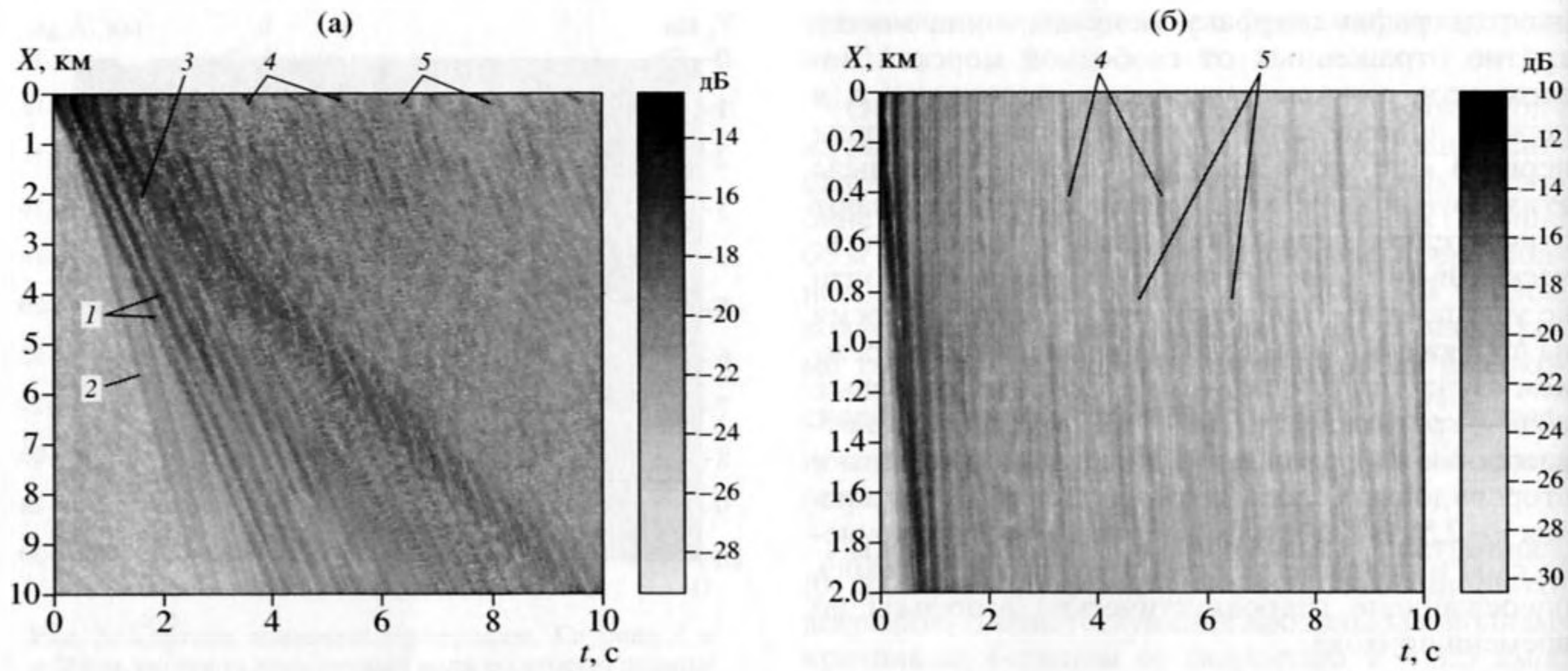

Рис. 5. (а) Картина волновых годографов. Глубина Z = 366 м, скорость поперечных волн во втором донном слое $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с. (б) Картина волновых годографов на рис. 5а для интервала расстояний 0–2 км.

поперечных волн, что может быть использовано в качестве информативного признака присутствия флюидосодержащих включений. Вероятно, этот факт должен проявиться непосредственно и в экспериментах по сейсмическому зондированию месторождений, в которых нефтезалежь сосредоточена по преимуществу в области придонных слоев.

Справедливость указанной тенденции подтверждается на картине волнового поля, рассчитанного для предельного случая нулевых значений скорости волн сдвига во всех областях донной среды $V_S^{(2,3,4)}$ = 0. Результат этого расчета представлен на рис. 6. Очевидно, теперь картина формируется еще более ярко выраженными кратно отраженными гидроакустическими импульсами и импульсами продольных волн, преломленных во втором слое и в фундаменте при полном отсутствии вклада поперечных волн. Интенсивно "засвечиваемый" на плоскости дальность – время прихода сектор углов соответствует интервалу скоростей от 0.5 км/с до 2.5 км/с и включает даже 4 км/с, что совпадает с заданными для расчета параметрами.

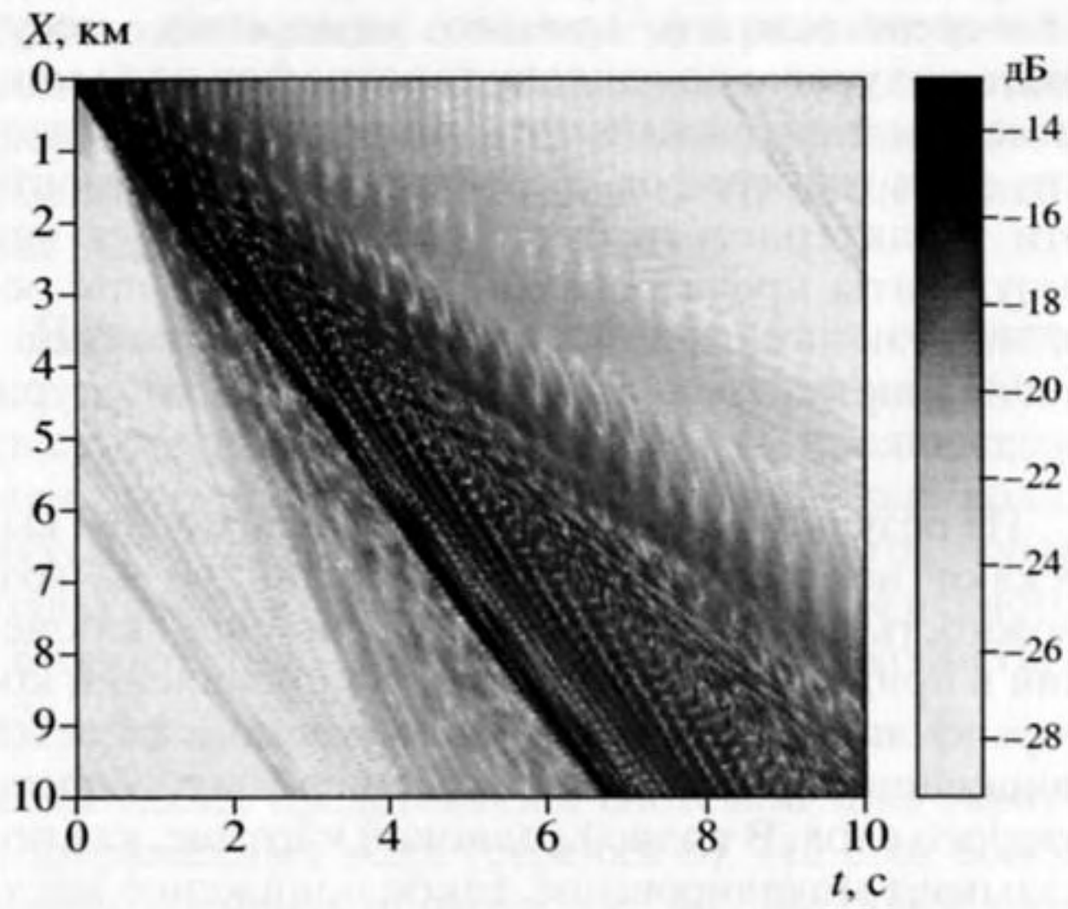

Рис. 6. Картина волновых годографов. Глубина Z = = 366 м, во всей донной среде нулевая скорость поперечных волн $V_S^{(2,3,4)}$ = 0.

Результаты проведенного моделирования волновых полей создают имитацию реальных сейсмических или гидроакустических сигналов, причем аналогичное представление данных в виде записи осциллограмм друг под другом используется и в натурных экспериментах, на основе которых по результатам интерпретации линий волновых годографов на плоскости дальность – время делаются соответствующие заключения о различных волновых типах, распространяющихся в донной среде. В процессе реконструкции самой донной структуры при поиске залежей полезных ископаемых в недрах осуществляется процедура обработки, в которой используется информация, заложенная в картине волнового поля, и такой подход является традиционным для разведочной геофизики.

Представленные результаты численного моделирования сейсмоакустических полей даны как иллюстрация возможностей одного из развиваю-

щихся подходов в области мониторинга и сейсмоакустической томографии морского дна, необходимых для постоянного совершенствования ее теоретической базы. Результаты исследований, выполненных на простой слоистой модели, показывают принципиальную возможность оценки акустических параметров дна, таких как скорость распространения в нем продольных и поперечных волн, что весьма важно для решения задачи восстановления априори неизвестной его структуры. Показана высокая чувствительность пространственно-временного распределения акустического поля в воде и ближайших донных слоях в исследуемом диапазоне частот к изменению скорости поперечных волн в грунте. При этом в дальнейшем для моделирования могут употребляться как упрощенные, так и более усложненные модели слоистых структур, различные варианты размещения источников и приемных антенн, применяться алгоритмы, реализующие различные процедуры пространственно-временной обработки акустических полей. Имеется ряд перспективных направлений, по которым будут продвигаться дальнейшие разработки, связанные с компьютерным моделированием упругих волновых полей. Основные из них известны из публикаций, представленных в библиографии, хотя некоторые – могут быть развитием и настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островский А.А.* Донные эксперименты // М.: Наука, 1998. 255 с.
2. *Антонов В.П., Бородин В.В., Кузнецов Г.Н., Кузьменко А.А., Тебякин В.П.* Реконструкция параметров многослойного дна мелкого моря // Сб. Тр. школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". М., 1998. С. 91–96.
3. *Ивакин А.Н.* Модели рассеяния звука дном океана. Современное состояние // Сб. Тр. школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". М., 1998. С. 84–91.
4. *Ильин А.В.* О геологических моделях дна в акустике океана // Научно-технический Сб. "Акустические волны в океане". М.: Наука, 1987. С. 130–137.
5. Акустика дна океана // Сб. статей: Ред. У. Куперман, Ф. Енсен. М.: Мир, 1984. 454 с.
6. *Брайан Л.* Подводный звук в морской геологии // Подводная акустика. М.: Мир, 1970. С. 449–462.
7. *Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В.* Численное моделирование структуры низкочастотных упругих полей при сейсмическом профилировании дна на мелководных акваториях // Сборник Тр. XIV Сессии РАО и X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". М., 2004. С. 366–369.

A Numerical Modeling of the Wave Field in Seismic Profiling of the Sea Floor

Yu. M. Zaslavskiĭ, B. V. Kerzhakov, and V. V. Kulinich

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhnii Novgorod, 603950 Russia

e-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Abstract—The seismoacoustic field produced by an omnidirectional sound source located near the bottom of a shallow-water sea is numerically modeled at the frequencies lower than 100 Hz. The main types of the waves that are excited and scattered in the fluid and the layered bottom medium are represented in the form of wave hodographs on the distance–arrival time plane. A possibility to solve some problems of acoustic tomography of the bottom is demonstrated, in particular, the problem of determining the thickness of the bottom sediment layers and the velocities of the longitudinal and transverse waves propagating in them. By varying the elastic parameters of the layered bottom model, typical changes in the wave field are analyzed, and the possibility to predict the presence of oil-saturated layers in the sea floor is established.