

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО- И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ

© 2019 г. Ю. М. Заславский<sup>a, \*</sup>, В. Ю. Заславский<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия

<sup>b</sup>Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

\*e-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 17.11.2017 г.

После доработки 18.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

На основе конечно-элементного метода выполнено трехмерное численное моделирование гидро- и сейсмоакустических волн на мелководье, порождаемых гармонически осциллирующими источниками. Анализируются особенности акустических волн в воде, а также сейсмических волн в донной толще и поверхностной волны на границе раздела жидкость-дно. Результаты численного 3D моделирования представлены иллюстрациями амплитудного волнового распределения в контактирующих средах для разной глубины погружения источника.

*Ключевые слова:* гидроакустическая, сейсмоакустическая волна, конечно-элементный метод, трехмерное численное моделирование, шельф

DOI: 10.1134/S0320791919040191

### ВВЕДЕНИЕ

Характеристики гидро- и сейсмоакустических волн на мелководье, генерируемые гидроакустическими источниками, исследуются достаточно давно многочисленными авторами [1–8]. Актуальность исследований обусловлена востребованностью проблемы зондирования и реконструкции структуры и состава донной толщи вблизи источника, что составляет предмет морской сейморазведки. Вместе с тем, интерес к анализу возможности дистанционной оценки и удаленного контроля пространственного местоположения автономно работающих источников излучения при морской сейморазведке также повышен. Несмотря на значительные продвижения в вопросах локализации источника излучения при разнообразных гидрогеологических морских условиях, диагностика глубины погружения источника средствами гидроакустического пеленгования остается актуальной прикладной проблемой. В связи с этим в настоящей работе упомянутая проблема анализируется на основе численного 3D моделирования амплитудного распределения акустических полей, генерируемых гармонически осциллирующими гидроакустическими источниками.

Решение задачи локализации источника по глубине, в значительной степени успешное, осуществляется путем регистрации гидроакустического поля антенными решетками — горизон-

тальной и вертикальной [9]. Повышение эффективности диагностики глубины погружения может быть основано, например, на регистрации полей других типов, возбуждаемых наряду с гидроакустическими, при том, что сопутствующие волны обладают особенностями пространственных характеристик, отличающими их от гидроакустических. Они также могут содержать диагностические признаки, позволяющие оценить искомый параметр — глубину погружения источника излучения. Поэтому дополнительно к гидроакустическому полю предполагается использовать донную поверхностную волну рэлеевского типа, которая также может нести информативный признак, обеспечивающий повышение надежности оценки глубины погружения. При этом предлагаемый подход к решению задачи основывается на своеобразии характера “волнового рельефа”, образуемого пространственным распределением амплитуды поля поверхностной сейсмоакустической волны на границе раздела вода-дно. С этой целью в статье представлены некоторые результаты численного трехмерного моделирования амплитудного пространственного распределения гидро- и сейсмоакустического полей с использованием конечно-элементного метода. Аналогичные исследования с использованием известных численных методов проводилось многими авторами [10], но в рассматриваемом случае основное внимание обращается на особенности структуры поверхностной донной сейсмической волны на границе вода-дно, создаваемой элементарными акустиче-

скими источниками при их погружении в воду на разную глубину.

### ПОВЕРХНОСТНАЯ ВОЛНА НА ГРАНИЦЕ ВОДА–ДНО

Физическая природа поверхностной сейсмоакустической волны на границе вода–дно в модели водный слой – упругое полупространство проанализирована и поясняется в [1], в [11, 12] на основе аналитического расчета получены формулы, с помощью которых нетрудно оценить предельную дальность, на которой возможна регистра-

ция гармонического сигнала, создаваемого гидроакустическим источником, расположенным на некоторой глубине в водоеме. При этом предполагается регистрация либо на гидрофон (расположенный вблизи границы вода–дно), либо на сейсмоприемник, установленный на самой донной границе, в связи с чем расчетные формулы представлены для глубин в области дно–источник ( $h \leq z \leq H$ ) и для донной толщи ( $z \geq H$ ). Исходные выражения для волновых смещений, генерируемых, например, дипольным источником, следующие:

$$u_z^{hyd} = \frac{-iF_0 k_t^4}{2\pi\omega^2 \rho''} \int_0^\infty \frac{\xi_1 \cos \xi_1 h \cos \xi_1 z}{\cos \xi_1 H \left( (2k^2 - k_t^2)^2 + 4k^2 \xi_1 \xi_t \right) \cos \xi_1 H - i \frac{\rho' \xi_1 k_t^4}{\rho'' \xi_1} \sin \xi_1 H} J_0(kr) k dk, \quad (1)$$

$$h \leq z \leq H,$$

$$u_z^{gr} = \frac{iF_0}{4\pi\rho'' c_t^2} \int_{-\infty}^\infty \frac{\left( (2k^2 - k_t^2) e^{-\kappa_1(z-H)} - 2k^2 e^{-\kappa_1(z-H)} \right) \kappa_1 \operatorname{ch} \kappa h}{\left( (2k^2 - k_t^2)^2 - 4k^2 \kappa_1 \kappa_1 \right) \operatorname{ch} \kappa H + \frac{\rho' \kappa_1 k_t^4}{\rho'' \kappa} \operatorname{sh} \kappa H} H_0^{(1)}(kr) k dk, \quad (2)$$

$$z \geq H,$$

где нулевая отметка соответствует свободной водной поверхности,  $h$  – глубина погружения источника,  $H$  – полная глубина бассейна,  $\omega$  – частота осцилляций,  $k_l = \omega/c_l$ ,  $k_t = \omega/c_t$ ,  $\xi_1 = \sqrt{\omega^2/c_l^2 - k^2} = i\kappa_1 = i\sqrt{k^2 - \omega^2/c_l^2}$ ,  $\xi_t = \sqrt{\omega^2/c_t^2 - k^2} = i\kappa_t = i\sqrt{k^2 - \omega^2/c_t^2}$ ,  $\xi = \sqrt{\omega^2/c^2 - k^2} = i\kappa = i\sqrt{k^2 - \omega^2/c^2}$ ,  $J_0(kr)$  – функция Бесселя нулевого порядка,  $H_0^{(1)}(kr)$  – функция Ханкеля нулевого порядка первого рода,  $c$  – скорость звука в воде,  $c_l$  – скорость продольных волн,  $c_t$  – скорость поперечных волн в грунте,  $F_0$  – амплитуда дипольного момента.

Обращение в нуль знаменателя подынтегрального выражения в (2) представляет собой диспер-

сионное уравнение для поверхностных волн в структуре водный слой–упругое полупространство. Три первые ветви, характеризующие дисперсионную зависимость  $c_R/c$  от аргумента  $\omega H/c$ , представлены на рис. 1, когда имеют место следующие соотношения параметров сред  $\rho'/\rho'' = 1/2$ ,  $c_t^2/c^2 = 2$ ,  $c_l^2/c_t^2 = 1/3$ , где  $\rho'$  – плотность воды,  $\rho''$  – плотность грунта.

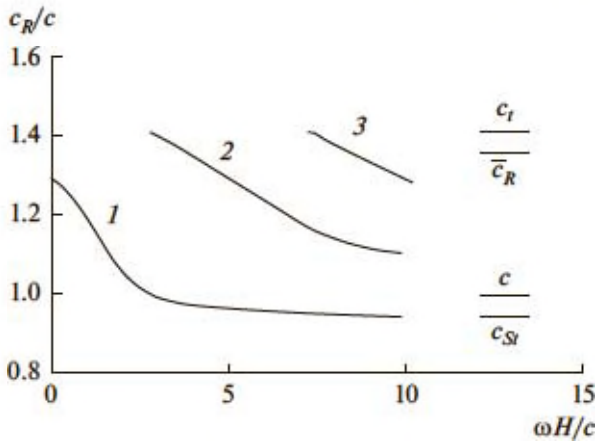
Интегралы в (1), (2) допускают асимптотическую оценку в дальней зоне излучения ( $k_R r \gg 1$ ). Так, поверхностная донная волна определяется из интегральных выражений (1), (2) как полувычет в точке  $k_R$  – волнового числа поверхностной волны рэлеевского типа

$$u_z^{hyd} = \frac{F_0}{2\omega^2 \rho''} \sqrt{\frac{2}{\pi k_R r}} \frac{e^{ik_R r - i\pi/4} \kappa_1 k_R^2 \cos \xi_1 h \cos \xi_1 z_{(k_R)}}{\cos^2 \xi_1 H_{(k_R)} \left( 2 \left( 2 \frac{k_R^4}{k_t^4} \left( 2 - \frac{\kappa_1}{\kappa_t} - \frac{\kappa_t}{\kappa_1} \right) - 1 \right) - \frac{\rho' H \kappa_1 k_R^2}{\rho'' \xi_1^2} \right)}, \quad (3)$$

$$h \leq z \leq H,$$

$$u_z^{gr} = \frac{-F_0}{2\omega^2 \rho''} \sqrt{\frac{2}{\pi k_R r}} \frac{e^{ik_R r - i\pi/4} \kappa_1 k_R^2 \left( \left( 2 \frac{k_R^2}{k_t^2} - 1 \right) e^{-\kappa_1(z-H)} - 2 \frac{k_R^2}{k_t^2} e^{-\kappa_1(z-H)} \right) \operatorname{ch} \kappa h_{(k_R)}}{\operatorname{ch} \kappa H_{(k_R)} \left( 2 \left( 2 \frac{k_R^4}{k_t^4} \left( 2 - \frac{\kappa_1}{\kappa_t} - \frac{\kappa_t}{\kappa_1} \right) - 1 \right) + \frac{\rho' H \kappa_1 k_R^2}{\rho'' \kappa^2} \right)}, \quad (4)$$

$$z \geq H.$$



**Рис. 1.** Дисперсионные характеристики донной поверхностной волны: 1 – фундаментальная мода, 2, 3 – волновые моды высших номеров при следующих соотношениях параметров структуры:  $\rho'/\rho'' = 1/2$ ,  $c_t^2/c^2 = 2$ ,  $c_t^2/c_t'^2 = 1/3$ .

Наряду с заданием параметров среды, частоты  $\omega$  и амплитуды дипольного момента источника  $F_0$ , также необходимо введение поправки на учет диссипативного фактора в формулы (3), (4), что в итоге позволит оценить амплитуду колебательных смещений частиц среды в воде  $u_z^{hyd}$  и в донном грунте  $u_z^{gr}$  при произвольных координате  $z$  и удалении  $r$ .

Аналитические формулы, представленные в изложенной преамбуле, соответствуют простейшей однородной структуре вода-дно, при этом они позволяют получить некоторые заключения, важные для практики. В частности, при скорости волн сдвига в дне, меньшей скорости звука в жидкости, отсутствует действительный корень знаменателя в (2) и, следовательно, поверхностная волна в структуре не распространяется. Далее на иллюстрациях показано, что в этих условиях возникает некоторая хаотичность в характере волнового рельефа, возбуждаемого гидроакустическим источником, установленным в воде вблизи донной границы.

### МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как показал анализ гидро- и сейсмоакустического волновых полей, возбуждаемых на мелководье, в условиях, когда дно достаточно жесткое, наряду с объемными волнами, распространяющимися вглубь контактирующих сред, на границе раздела вода-дно формируется поверхностная сейсмическая волна. Для возбуждения на границе раздела такой волны упругие параметры донной среды должны удо-

влетворять неравенству  $c_t > c_t' > c$ , где  $c_{t,t'}$  – скорости волн сжатия и сдвига в донной среде, а  $c$  – скорость звука в воде [13], при этом амплитудное распределение в поверхностной волне представляет собой волновой рельеф в виде концентрических кругов, разбегающихся из эпицентра. Указанное выше неравенство обеспечивается подходящим выбором параметров среды, в частности, при моделировании случая однородного скального донного грунта могут быть приняты следующие значения упругих параметров:

$c_t = 6.12$ ,  $c_t' = 3.08$  км/с,  $\rho = 2.73$  г/см<sup>3</sup>. Однако для адекватности расчетной модели реальному разрезу в придонной области далее наряду с однородной также рассматривается модель в виде трехслойной структуры, содержащей под границей вода-грунт (на глубине 6 м) придонный тонкий прослой (толщиной 4 м) с пониженной жесткостью и плотностью  $c_t = 1.931$ ,  $c_t' = 0.77$  км/с,  $\rho = 1.15$  г/см<sup>3</sup> (что специально оговаривается ниже).

Предполагается гармонический режим излучения, в котором используются частоты  $f = 180, 200$  Гц. В последнем случае длина гидроакустической волны составляет 7.5 м, при этом амплитудное распределение может быть построено и для более низких частот, доминирующих, как известно, в спектре излучения техногенных источников. Расчетная область представляет собой куб со стороной  $100 \times 100 \times 100$  м, линейный размер конечного элемента при дискретизации равен 0.1 длины волны в воде, а общее число элементов  $\sim 2 \times 10^6$ . Верхняя часть куба (0–50 м) – пространство, занятое водой, нижняя часть (50–100 м) – донная толща. Заметим, что при выбранном шаге узлов сетки, составляющем 0.1 длины гидроакустической волны, обеспечивается корректность расчета поля в воде, а так как в области, моделирующей дно, шаг сетки практически тот же, то последний составит 0.025 длины продольной и 0.05 длины поверхностной волны, поскольку скорости волн, распространяющихся в указанной области, превышают гидроакустическую примерно в два раза для поверхностной и в четыре – для продольной волны. Следовательно, и в твердом дне за счет достаточно мелкого шага дискретизации соблюдается корректность при описании поля. Выбор масштаба обзорного пространства ( $\sim 100$  м) и сравнительно высокая частота пульсаций источника ( $\sim 200$  Гц) продиктованы подходящими условиями для демонстрации принципиальных возможностей подхода, однако для “перехода” при моделировании амплитудного распределения в область интересующих километровых масштабов с сохранением подобия достаточно выполнить “скейлинг” вниз по частоте

на две октавы, т.е. в область частот, создаваемых техногенными источниками.

В жидкости при гармоническом режиме излучения применительно к дипольному источнику решается уравнение:

$$\Delta p + (\omega^2/c^2)p = \frac{i\omega F_0}{2\pi r c} \delta(r)\delta(z), \quad (5)$$

где  $p$  — акустическое давление,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\delta(r), \delta(z)$  —  $\delta$ -функции радиальной и вертикальной координаты,  $[F_0] = H$  — дипольный момент источника.

Для твердой донной среды, где источники отсутствуют, решается уравнение:

$$\omega^2 \mathbf{u} + c_t^2 \nabla(\nabla, \mathbf{u}) - c_l^2 [\nabla[\nabla, \mathbf{u}]] = 0, \quad (6)$$

где  $\mathbf{u}$  — вектор упругих волновых смещений.

На боковых гранях куба в области жидкости, на боковых гранях и нижней грани куба в области твердого дна ставится граничное условие — “безотражательное распространение плоской волны на границе”, на свободной водной поверхности — условие “свободная граница”, на границе раздела вода—дно — условие “согласованная по акустическим импедансам”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Илистое дно, источник — пульсирующий монополю на глубине  $h = 40$  м*

Вначале рассмотрим результаты моделирования пространственного амплитудного распределения для случая рыхлого, илистого дна, где залегают лессовые породы, чтобы подчеркнуть контраст в различии его характера относительно упомянутого при высокой жесткости. Здесь для пояснения рассматривается простейшая однородная структура дна, характеризующаяся следующими значениями скоростей упругих волн и плотности грунта:  $c_l = 1.931$ ,  $c_t = 0.77$  км/с,  $\rho = 1.15$  г/см<sup>3</sup>. При незначительной жесткости дна кольцеобразное амплитудное распределение уже обозначено, но менее четко, чем в случае скальных донных пород. В условиях мягкого донного грунта и при расположении пульсирующего монополя на небольшом удалении от границы раздела — глубина погружения  $h = 40$  м, частота пульсаций  $f = 200$  Гц, пространственное распределение амплитуды волновых возмущений на дне вблизи источника не строго периодическое и их профиль на границе не носит регулярный характер, что видно из иллюстраций, представленных на рис. 2а, 2б. На рис. 2а в  $x, y$ -плоскости (изометрическая проекция) демонстрируется пространственное распределение амплитуды на границе раздела вода—дно. На рис. 2б, где показано сече-

ние  $y, z$ -плоскостью, вверху представлено амплитудное распределение в гидроакустической, а внизу — в сейсмоакустической волне.

*Модель дна — скальный грунт с лессовым прослоем у границы, источник — осциллирующий диполь на глубине  $h = 40$  м*

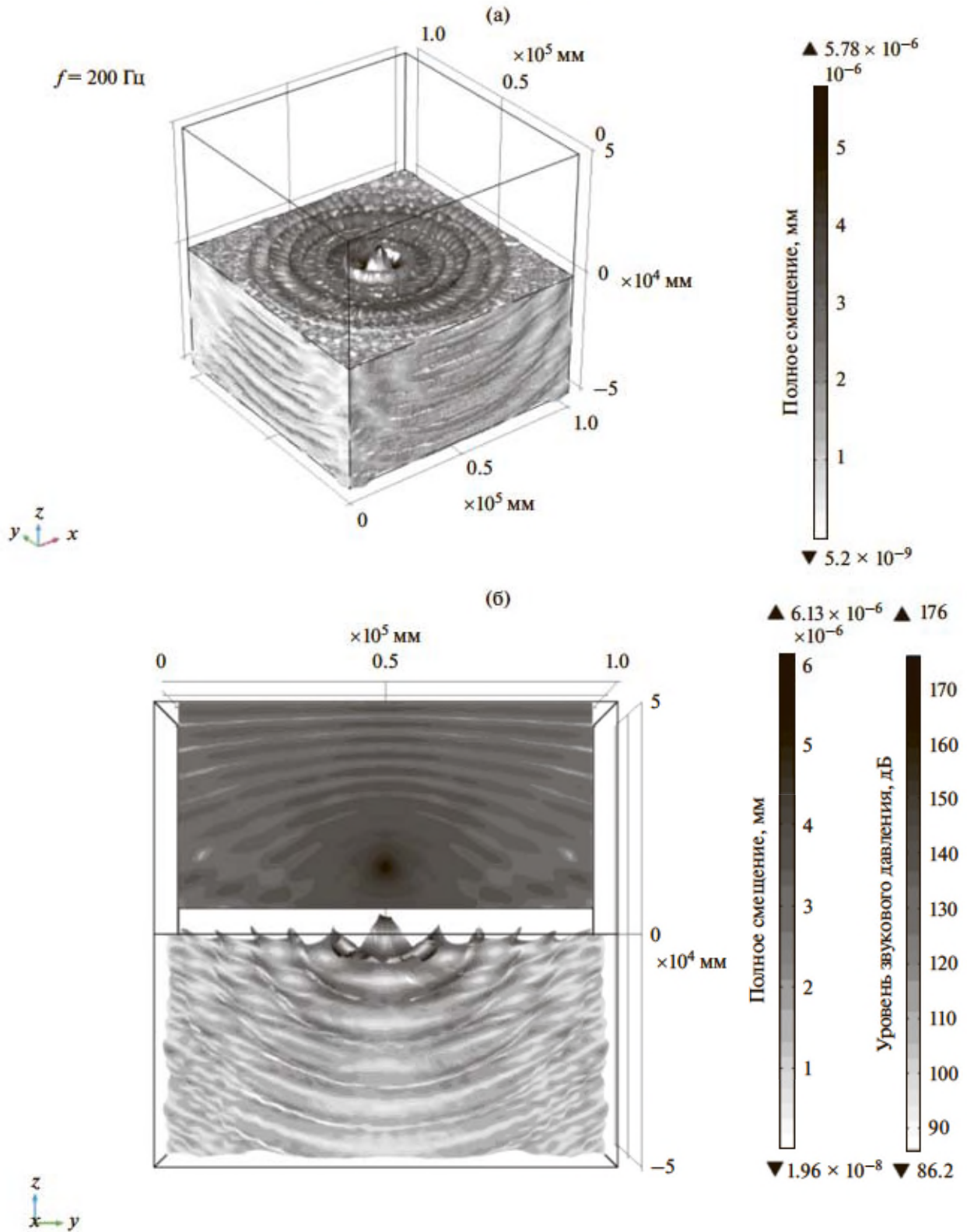
На рис. 3 (частота  $f = 180$  Гц), рис. 4 (частота  $f = 200$  Гц) показано волновое поле, построенное для случая скального дна  $c_l = 6.12$ ,  $c_t = 3.08$  км/с,  $\rho = 2.73$  г/см<sup>3</sup> (с упомянутым прослоем вблизи границы  $c_l = 1.931$ ,  $c_t = 0.77$  км/с,  $\rho = 1.15$  г/см<sup>3</sup>). Гидроакустическое излучение создается акустическим диполем, поляризованным вдоль оси  $y$ , полная глубина водоема  $H = 50$  м, глубина погружения источника  $h = 40$  м. В изометрической проекции представлено распределение амплитуды в гидроакустической волне (для поперечного  $y, z$ -сечения — верхняя часть) и в объемной и поверхностной донно-сейсмических волнах (в нижней части рисунка).

Для гидроакустического поля характерна амплитудная модуляция с формированием радиально-лучевой волновой структуры со сходящимися к точке излучателя полосами равной засветки. Следует полагать, что такая структура может представлять собой информативный признак, который способствует указанию местоположения излучателя.

Характерной особенностью структуры поля поверхностной донной волны являются две-три концентрически расположенные окружности, на которых амплитуда пучности максимальна и которые обозначают разбегающиеся по кругу волны. Диаметр кольца с максимумом амплитуды на волновом рельефе, образуемом поверхностной волной, в данном случае заметно меньше полной глубины бассейна. Наблюдаемая особенность структуры поверхностной донной волны также может быть принята как физическая предпосылка или как характерный признак, несущий информацию о глубине погружения источника излучения.

Проникшие в дно объемные волны сжатия и сдвига создают картину биений вследствие их интерференции. Очевидно, что ввиду невозможности практической реализации считывания картины объемного сейсмического поля в донной области пространства для выявления указанных признаков остается возможным использовать характерные особенности только у поверхностной сейсмоакустической и у гидроакустической волны.

Структуры полей, представленных выше на рис. 3 и рис. 4, отличаются только некоторыми особенностями, связанными со сменой характера



**Рис. 2.** (а) Пространственное распределение амплитуды поверхностной волны (волновой рельеф) на границе рыхлой донной среды (плоскость  $xy$ )  $c_l = 1.931$ ,  $c_t = 0.77$  км/с,  $\rho = 1.15$  г/см<sup>3</sup>. Источник – монополюс, частота  $f = 200$  Гц. (б) Вертикальное сечение  $yz$ -плоскостью. Вверху – поле гидроакустических волн в воде. Внизу – поле объемных сейсмических волн и ближнеполюсные возмущения на границе рыхлой донной среды.

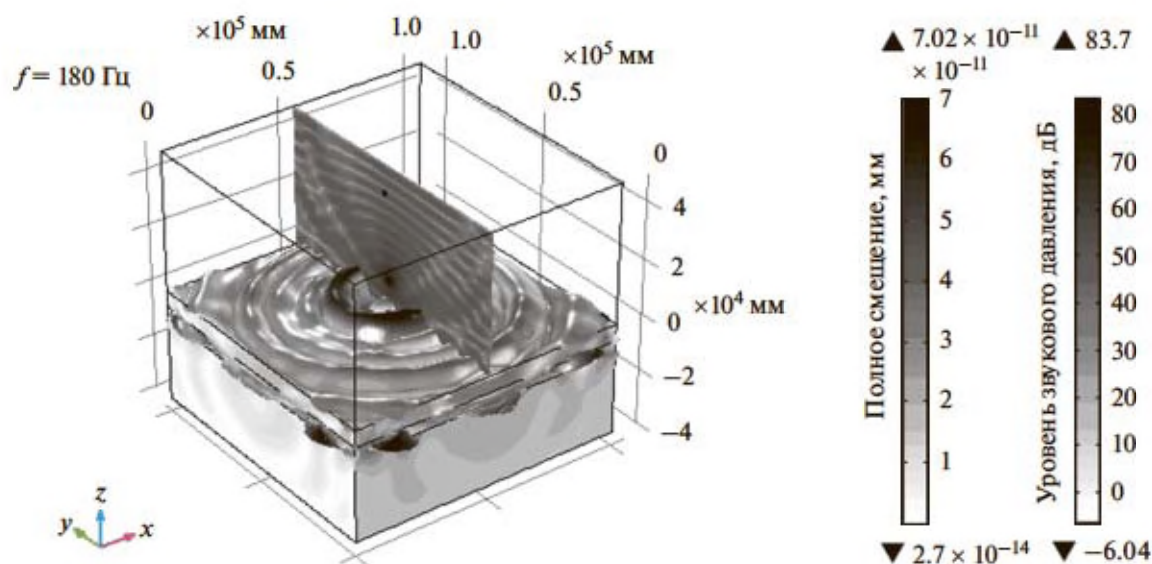


Рис. 3. Пространственное распределение волновых амплитуд диполя ( $y$  – поляризация, изометрия) с частотой осциллирующей  $f = 180$  Гц. Глубина погружения 40 м. Верх – гидроакустическая волна ( $yz$  – сечение). Низ – поверхностная и объемная (донная) сейсмические волны, скальный грунт  $c_l = 6.12$ ,  $c_t = 3.08$  км/с,  $\rho = 2.73$  г/см<sup>3</sup> (с тонкими прослоями).

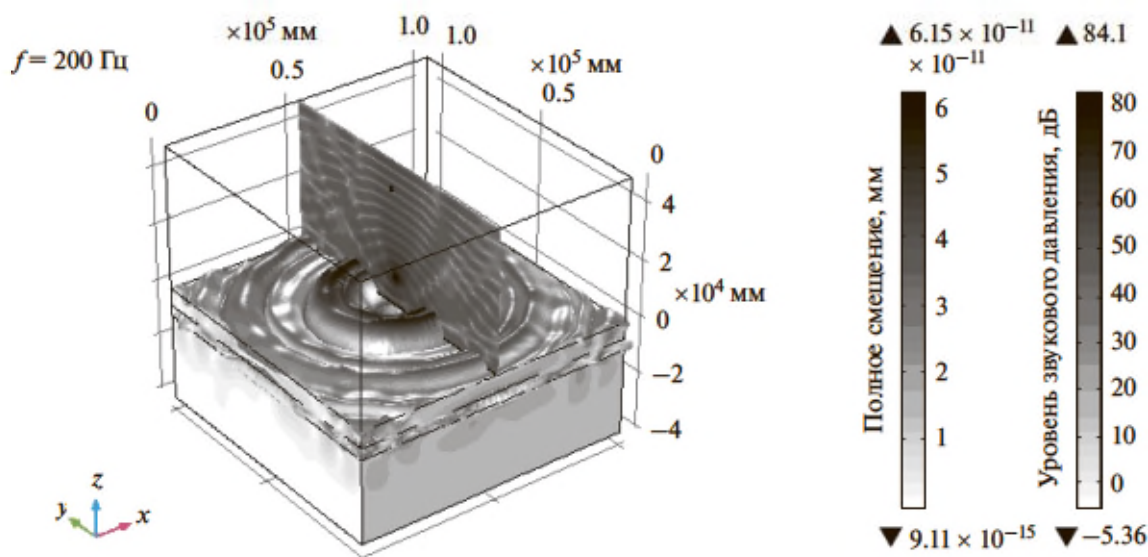


Рис. 4. То же, что и на рис. 3 при частоте осцилляций  $f = 200$  Гц и глубине погружения 40 м.

азимутальной модуляции по амплитуде для случая двух частот, сдвинутых относительно друг друга. Значительных изменений амплитудного распределения в радиальном направлении нет, что подтверждает возможность получения надежных результатов моделирования и физически обоснованных выводов.

*Источник – осциллирующий диполь на глубине  $h = 10$  м*

На рис. 5 (частота  $f = 180$  Гц), рис. 6 (частота  $f = 200$  Гц) показано аналогичное предыдущему случаю распределение амплитуды для поперечного  $y, z$ -сечения в гидроакустической волне

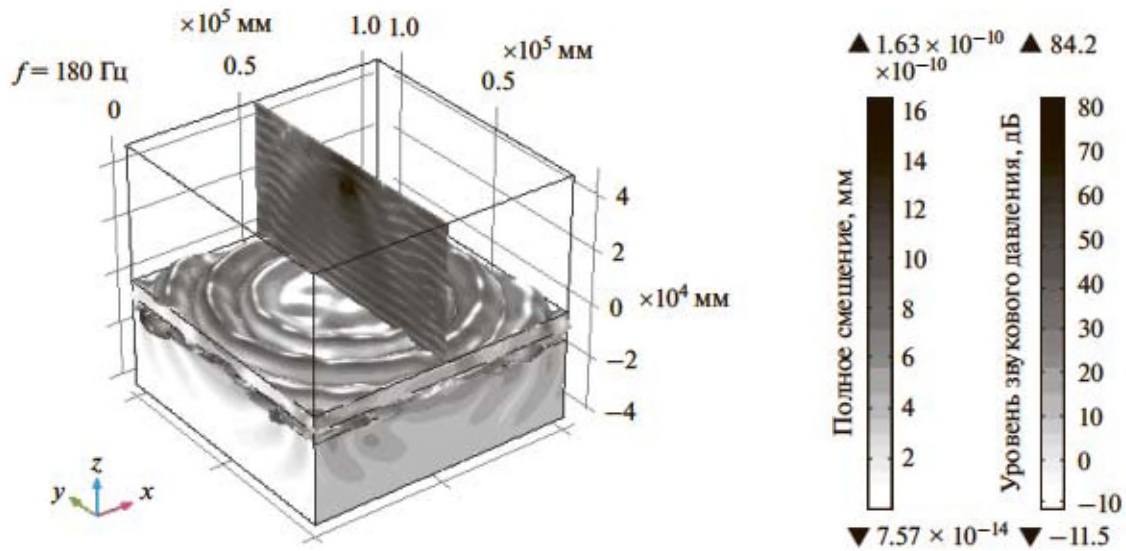


Рис. 5. То же, что и на рис. 3 при частоте осцилляций  $f = 180 \text{ Гц}$  и глубине погружения 10 м.

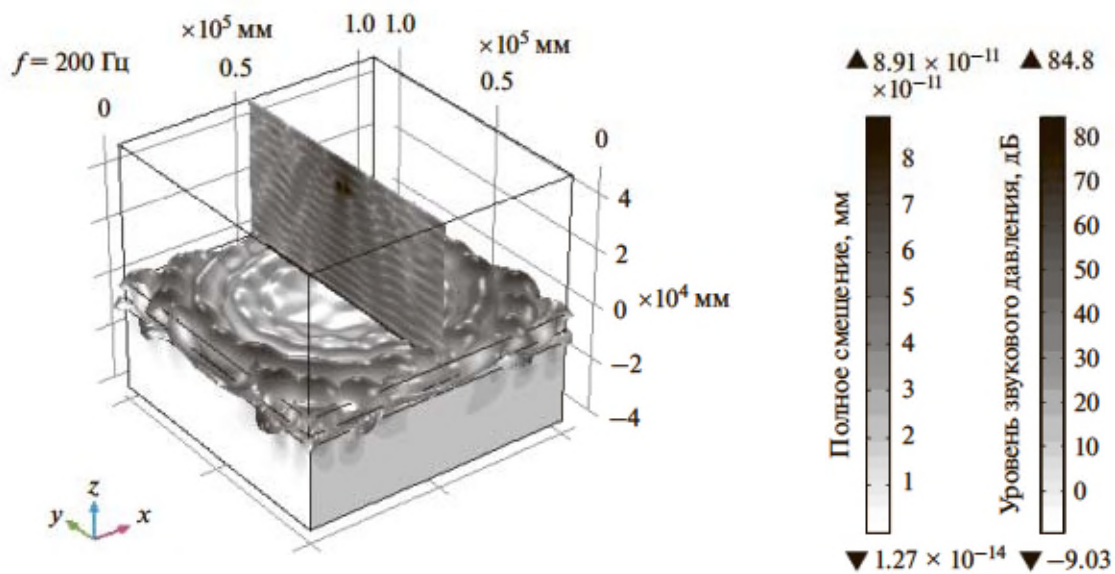


Рис. 6. То же, что и на рис. 3 при частоте осцилляций  $f = 200 \text{ Гц}$  и глубине погружения 10 м.

(верхняя часть) и в изометрической проекции для донно-сейсмических волн (объемной и поверхностной – нижняя часть). Дублирование на двух частотах, подобно уже продемонстрированному, повышает надежность результатов моделирования. В верхней части рис. 5, рис. 6 представлен результат моделирования амплитудного распределения гидроакустической волны в поперечном  $y, z$ -сечении. Очевидна “перевернутость” вершины центра сходимости радиальных полос равной засветки по сравнению с рассмотренным выше,

что объясняется изменением в расположении излучателя – вблизи свободной границы жидкости.

В нижней части рис. 5, рис. 6 демонстрируется распределение колебаний в поле поверхностной донной волны на границе раздела. Характерно, что диаметр кольца с максимальной пучностью на волновом рельефе, образуемом амплитудным распределением поверхностной донной волны, здесь приблизительно равен полной глубине бассейна в точке погружения, или, по крайней мере, больше половины глубины бассейна. Следовательно, такой параметр как отношение диаметра

кольца с максимальной пучностью к полной глубине можно принять в качестве критерия или признака глубины погружения, или связанного с ним удаления источника от дна водоема. В случае, представленном на рис. 5, рис. 6, информативный параметр оказался больше 0.5, что соответствует мелкому погружению источника, или значительному удалению от дна.

Сравнивая диаметры колец с максимумом интенсивности в поверхностном волновом рельефе в рассмотренных выше случаях: излучателя вблизи свободной водной поверхности и в другом — вблизи дна, можно предположить, что их разница обусловлена тем, что в первом случае преобладает влияние интерференции от “пары источников” — исходного и его зеркального отражения, образованного близко расположенной верхней свободной границей, а во втором — это следствие интерференции волн, порождаемых “парой источников”, в которой второй образован зеркальным отражением от ближайшей нижней донной границы.

Необходимо подчеркнуть, что в предшествующих исследованиях [11, 12] также моделировалась донно-сейсмическая поверхностная волна, генерируемая аналогичными источниками, но рассматривалась однородная структура дна, сложенная скальными породами. В этом случае уже наблюдалась характерная особенность в виде концентрически кольцеобразного волнового рельефа поверхностных волн рэлеевского типа, разбегающихся от центра к периферии. При этом сравнение диаметра колец, соответствующих максимальному уровню пучностей на волновом рельефе при разной глубине погружения источника в обоих случаях: однородной донной толщи и донной структуры с приповерхностной неоднородностью (рассмотренной в настоящей работе), показывает, что их соотношение в значительной степени подобно. При наличии слоистости дна характерна некоторая азимутальная изрезанность амплитудного распределения, а для однородной модели она выполняется при сохранении кольцеобразного распределения по радиусу.

Заметим, что вопрос об абсолютных значениях уровня поверхностной донной сейсмоакустической волны не обсуждается, ввиду направленности работы на качественный анализ волнового рельефа, образуемого пространственным амплитудно-волновым распределением на границе раздела сред, и рассмотрение его характерных особенностей. Вместе с тем, численное моделирование позволяет считывать количественные амплитудные значения. Сравнение этих величин (волновых смещений нормальной поляризации) в гидроакустической и в сейсмоакустической волнах, проведенное в точках у границы раздела в ближней зоне источника, показало их примерное равенство. Следует также указать, что в отличие от гидроаку-

стической поверхностная донная сейсмическая волна, распространяясь в сторону суши вдоль “обводненного” участка донной границы, где имеет место контакт с водой, может далее проникать и на сухопутную ее часть на все большее удаление от кромки вода–берег.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном моделировании интерес представляют особенности донных сейсмоакустических колебаний на границе раздела вода-дно, регистрация которых датчиками донной антенны может быть положена в основу бесконтактного удаленного контроля. Моделирование пространственной структуры гидроакустического поля и поверхностной донной сейсмоакустической волны выполнено с целью выявления отличий пространственно-амплитудного распределения в донной волне при различной глубине погружения гидроакустического источника. Показано, что наличие придонной слоистости не оказывает существенного влияния на распределение амплитуды в кольцеобразном волновом рельефе. Это вытекает из сравнения представленных в работе амплитудных волновых рельефов, образуемых сейсмоакустической поверхностной волной на границе раздела, с аналогичными, полученными ранее применительно к модели с однородной структурой дна. Решающим фактором, определяющим величину диаметра колец, соответствующих максимальному уровню пучностей на кольцеобразном волновом рельефе, является глубина погружения источника, что и позволяет рассматривать его как диагностический признак.

Таким образом, путем численного моделирования установлено, что кольцеобразность пространственного амплитудного волнового рельефа, образуемого распределением амплитуды сейсмоакустической поверхностной волны на границе вода-дно, может представлять собой информативный признак, позволяющий определять глубину погружения источника под поверхность воды на мелководной акватории. С использованием планарной донной антенны с хорошо развитой апертурой в виде двумерной решетки оптоволоконных геофонов-гидрофонов возможно считывание волнового рельефа с кольцеобразным распределением пучностей поверхностной волны на границе вода-дно, что в перспективе позволит на этой основе повысить надежность и эффективность существующих систем регистрации и определения глубины погружения источника излучения.

Авторы благодарят П.И. Коротина за полезные замечания при обсуждении работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2014-0010).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М., Гордин О.А.* Акустика неоднородных сред. Т. 1. Основы теории отражения и распространения звука. М.: Наука, 2007.
2. *Бреховских Л.М.* Акустика океанской среды. Москва: Наука, АН СССР, 1989. 222 с.
3. *Гордин О.А.* Взаимодействие поверхностных волн и объемных волн в мелком море с плавно меняющейся глубиной // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 6. С. 809–816.
4. *Godin O.A., Chapman D.M.F.* Dispersion of interface waves in sediments with power law shear speed profiles. I: Exact and approximate analytical results // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. № 4. P. 1890–1907.
5. *Рутенко А.Н., Манульчев Д.С., Соловьев А.А.* Исследование распространения энергии низкочастотных акустических и сейсмических волн на шельфе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 363–377.
6. *Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Воекголт М.* Мониторинг акустического поля сейсморазведочных импульсов в прибрежной зоне // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
7. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 193 с.
8. *Келлер Дж., Пападакис Дж.* Распространение волн и подводная акустика. М.: Мир, 1980. 232 с.
9. *Лучинин А.Г., Хилько А.И.* Маломодовая акустика мелкого моря // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181. № 11. С. 1222–1228. *Phys. Usp.*, 54: 11(2011), 1181–1186.
10. *Jensen F.V., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H.* *Computation Ocean Acoustics.* Springer, 2011.
11. *Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.* О моделировании поверхностной донной волны на шельфе // Электронный журнал “Техническая акустика”. URL: <http://www.ejta.org>. 2018. № 1.
12. *Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.* Численное моделирование гидро- и сейсмоакустических волн на шельфе, возбуждаемых судном // 14-я Всероссийская конференция “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. С-Петербург, 2018. С. 486–489.
13. *Лапин А.Д.* Определение параметров грунта по дисперсионной кривой поверхностной волны // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 1. С. 181–183.