

¹Ю. М. Заславский, ^{1,2}В. Ю. Заславский

¹*Институт прикладной физики Российской академии наук.*

Россия 603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46, тел.(831)4164764, факс: (831)4365976.

²*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».*

E-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru

О моделировании поверхностной донной волны на шельфе

Получена 15.12.2017, опубликована 29.03.2018

В рамках трехмерного моделирования конечно-элементным методом проведен анализ пространственного распределения амплитуды донной волны, генерируемой гармонически пульсирующим акустическим монополюсом, погруженным в воду на мелководье. Волновое поле проанализировано для однородной и слоистой моделей дна при различных значениях жесткости донного грунта и при разных глубинах погружения источника. Полученные результаты могут найти применение в задачах морской сейсморазведки на шельфе.

Ключевые слова: шельф, гидроакустический источник, трехмерное численное моделирование, пространственное распределение амплитуды, поверхностная донная сейсмическая волна

ВВЕДЕНИЕ

Исследования возможности профилирования верхних слоев донной структуры шельфа приобретают повышенный интерес. Решению проблемы реконструкции слоистого строения донной среды обычными средствами морской сейсморазведки с использованием гидроакустических сигналов препятствует слабая разрешаемость мелких прослоев [1]. В настоящей работе излагается подход, демонстрирующий предпосылки, или признаки, полезные для дистанционной диагностики параметров слоистости, базирующиеся на использовании особенностей донной сейсмической поверхностной волны на границе вода-дно (поверхностная волна рэлеевского типа на интерфейсе). Анализ этого типа волн посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей [2]. В целях развития методов исследования строения донной структуры наряду с другими подходами [3] удобно использовать трехмерное численное моделирование методом конечных элементов, который позволяет подробно исследовать пространственное амплитудное волнового распределение в зоне, примыкающей к источнику излучения, к эпицентральной области дна, к границам раздела донной структуры и т.д. [4]. При этом

используются тоновые картины с визуализацией пространственного распределения гидроакустических волн в воде и объемных сейсмических – в донной толще, а также рельеф поверхностной донной волны на границе вода-дно, при регистрации которой достигается повышенное разрешение, а следовательно, информативность зондирования самой ближней к границе структуры дна, а следовательно и результативность или эффективность ее диагностики.

1. ПОВЕРХНОСТНАЯ ВОЛНА НА ГРАНИЦЕ ВОДА-ДНО. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ ПРОСТЕЙШЕЙ СТРУКТУРЫ

Физическая природа донной сейсмоакустической волны на границе вода-дно в модели водный слой – упругое полупространство проанализирована и поясняется в работах [5, 6]. В работе [4] на основе аналитического подхода получены расчетные формулы, с помощью которых нетрудно получить оценки предельной дальности, на которой возможна регистрация гармонического сигнала, создаваемого гидроакустическим (акустический монополь или диполь) 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 (или чуть глубже – в донной толще), в связи с чем, расчетная формула представлена для глубин в области дно-источник ($h \leq z \leq H$) и для донной толщи ($z \geq H$). С их помощью можно оценить уровень сигнала, используемый при решении задач прогноза слоистости дна или определения ее упругих параметров на удаленных дистанциях от источника. Исходные выражения для волновых смещений, порождаемых, например, дипольным источником, следующие:

$$u_z^{hyd} = \frac{F_0 k_t^4}{2\pi\omega^2 \rho''} \int_0^\infty \frac{\kappa_t \cos \xi h \cos \xi z J_0(kr) k dk}{\cos \xi H \left((2k^2 - k_t^2)^2 - 4k^2 \kappa_t \kappa_i \cos \xi H + \frac{\rho' \kappa_t k_t^4}{\rho'' \xi} \sin \xi H \right)}, h \leq z \leq H, \tag{1}$$

$$u_z^{gr} = \frac{iF_0}{2\pi\rho'' c_i^2} \int_0^\infty \frac{\left((2k^2 - k_t^2) e^{-\kappa_t(z-H)} - 2k^2 e^{-\kappa_i(z-H)} \right) \kappa_t c h k h}{\left((2k^2 - k_t^2)^2 - 4k^2 \kappa_t \kappa_i \right) c h k H + \frac{\rho' \kappa_t k_t^4}{\rho'' \kappa} s h k H} J_0(kr) k dk, z \geq H, \tag{2}$$

где нулевая отметка соответствует свободной водной поверхности, h – глубина источника, H – полная глубина бассейна, $\kappa_t = \sqrt{k^2 - \omega^2/c_t^2}$, $\kappa_i = \sqrt{k^2 - \omega^2/c_i^2}$, $\xi = \sqrt{\omega^2/c^2 - k^2} = i\kappa = i\sqrt{k^2 - \omega^2/c^2}$, $J_0(kr)$ – функция Бесселя нулевого порядка, c – скорость звука в воде, c_i – 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 дисперсионное уравнение для поверхностных волн в структуре: водный слой – упругое полупространство. Три первые ветви, характеризующие дисперсионную зависимость $c_R/c(\omega H/c)$, представлены на рис. 1, когда имеют место следующие соотно-

шения параметров среды $\rho'/\rho'' = 1/2$, $c_t^2/c^2 = 2$, $c_t^2/c_t^2 = 1/3$, где ρ' – плотность воды, ρ'' – плотность грунта. Линиями справа обозначены ориентировочные значения волновых скоростей: c_{St} – волны Стоунли, c – звуковой волны в воде, \bar{c}_R – волны Рэлея в твердом донном полупространстве, c_t – сдвиговой волны в твердой донной среде.

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

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

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

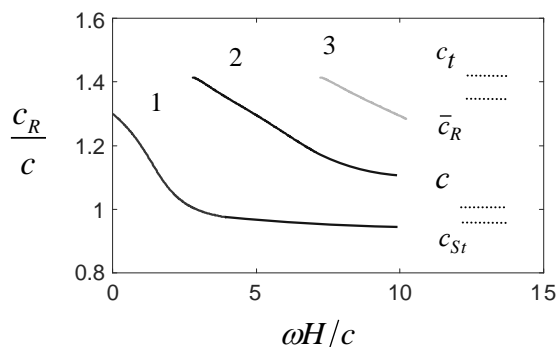


Рис. 1. Дисперсионные характеристики донной поверхностной волны: 1 – фундаментальная мода, 2, 3,.. – волновые моды высших номеров при следующих соотношениях параметров структуры: $\rho'/\rho'' = 1/2$, $c_t^2/c^2 = 2$, $c_t^2/c_t^2 = 1/3$

Из рассмотрения представленных дисперсионных характеристик следует, что в рамках грубой модели структуры, учитывающей только водный слой ($H = 50\text{м}$) и однородную полубезграничную донную толщу, фундаментальная мода занимает интервал инфразвуковых частот ($0 \leq f \leq 15$ Гц – область, где отсутствуют высшие моды), а высшие моды начинаются с частот отсечки 15 Гц, 30 Гц и т. д. Вследствие этого, если для зондирования придонной области с мелкослоистой структурой (прослой мощностью в несколько метров) предпочтительным является использование спектра в т. н. области «континуума», то потребуются привлечение сигналов на частотах более сотни герц.

При скорости волн сдвига в дне, меньшей скорости звука в жидкости, поверхностная волна в структуре не возбуждается, что приведет (как далее показано на иллюстрациях) к хаотичности характера волнового рельефа, возбуждаемого гидроакустическим источником, установленным в воде вблизи донной границы.

Заметим, что при оценке предельной дальности слышимости источника излучения путем регистрации этого типа волн на фоне шумового сигнала того или иного уровня, необходимо введение в формулы (3), (4) поправки на учет диссипативного фактора, а также задание таких количественных параметров как амплитуда дипольного момента источника (F_0) и амплитуда колебательных смещений частиц среды (в воде u_z^{hyd} , в донном грунте u_z^{gr}). При регистрации информативного сигнала на этих дистанциях без применения накопления, необходимо обеспечить его превышение над уровнем шумового фона на $\sim 3-6$ дБ (причем интегральный уровень последнего в единицах колебательной скорости составляет ~ 0.1 мкм/с). В случае, когда дно на шельфе сложено скальным грунтом, в условиях которого декремент затухания рэлеевской волны можно характеризовать величиной $\Theta_R \approx 0.1$, проведенные по представленным формулам оценки приводят к значениям предельной дальности порядка сотен метров при уровне воздействия в несколько килоньютонов.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ В СИСТЕМЕ ВОДА-ОДНОРОДНОЕ ДНО

Располагая изложенными данными теоретического анализа волнового возбуждения в структуре водный слой - однородное упругое полупространство, упрощенно моделирующей мелководье, вообще говоря, можно обратиться к результатам численного моделирования, выполненного применительно к более сложной модели, учитывающей слоистость структуры в приграничной донной области. Однако вначале рассмотрим результат моделирования пространственного распределения волновых амплитуд на примере указанной простейшей структуры, поскольку представляет интерес сравнение случаев, в одном из которых дно рыхлое, а в другом – скалистое, причем в первом из них, как уже отмечалось выше, поверхностная волна гидроакустическим источником не возбуждается.

Следует уточнить, что расчетная область при моделировании представляет собой куб со стороной $100 \times 100 \times 100$ м, линейный размер конечного элемента при дискретизации находится в пределах ~ 0.1 длины волны (которая, например, при частоте $f = 200$ Гц в воде составляет 7.5 м), общее число тетраэдральных элементов $\sim 2 \cdot 10^6$. Верхняя часть куба (0...50 м) – пространство, занятое водой, нижняя часть (–50 м...0) – донная толща.

Для области жидкости (в случае монопольного источника при гармоническом режиме излучения) решается уравнение:

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

где p – акустическое давление, Q – объемная производительность источника, $\delta(r)$, $\delta(z)$ – δ -функции радиальной и вертикальной координаты.

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

$$\omega^2 \vec{u} + c_i^2 \nabla(\nabla, \vec{u}) - c_i^2 [\nabla[\nabla, \vec{u}]] = 0, \tag{6}$$

где \vec{u} – вектор упругих волновых смещений.

На боковых гранях куба в области жидкости ставится граничное условие свободного излучения волн, на боковых гранях и нижней грани куба в области твердого дна – условие слабо отражающей границы, на свободной водной поверхности – условие свободной или мягкой границы, на границе вода-дно – условие согласования по акустическим импедансам.

На рис. 2(а, б) демонстрируется амплитудное распределение в случае волнового возбуждения монопольным источником, пульсирующим в мелководной акватории на глубине $h = 40$ м с частотой $f = 200$ Гц (полная глубина водоема $H = 50$ м) при рыхлом донном грунте (лесс), причем параметры донной среды здесь приняты следующими: $c_l = 1.93$ км/с, $c_t = 0.77$ км/с, $\rho = 1.15$ г/см³. Поверхностная волна на границе раздела выражена нечетко – только как рябь, вследствие отсутствия условий для ее возбуждения [5, 6]. Заметно, что на структуру поля в донной толще оказывает значительное влияние отражение гидроакустической волны от верхней свободной поверхности воды.

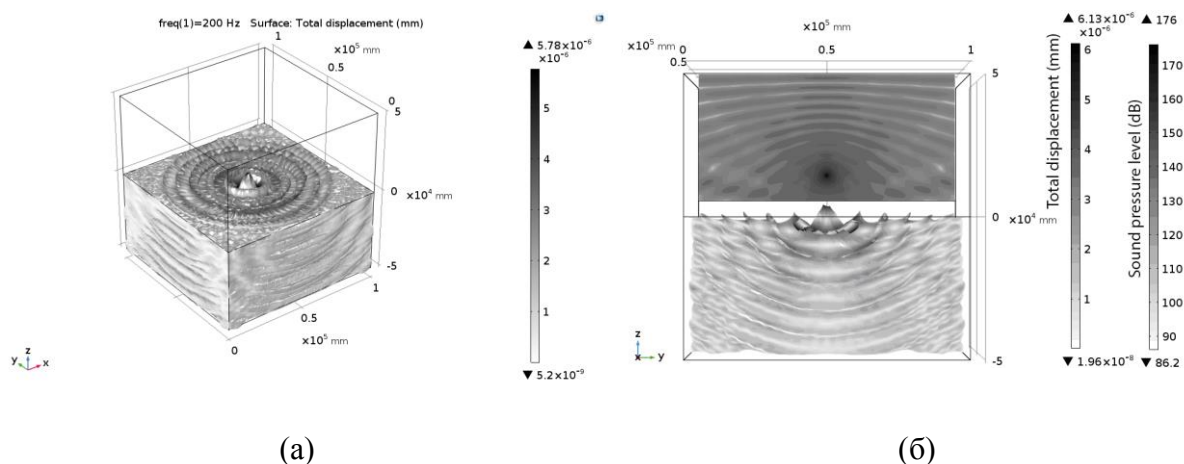


Рис. 2. Пространственное распределение при глубине погружения монополя $h = 40$ м. Рыхлый донный грунт: а – изометрия, б – плоскость y, z (вверху) вертикальный разрез поля акустического давления в воде, (внизу) поля упругих смещений в грунте

На рис. 3(а, б) также показано амплитудное волновое распределение, но в отличие от предыдущего, рассматривается случай, когда дно – скальный грунт: $c_l = 6.12$ км/с, $c_t = 3.08$ км/с, $\rho = 2.73$ г/см³. Как и в прежнем случае, на рис. 3(а) дан мгновенный снимок распределения амплитуды в изометрической проекции, кроме того, на вертикальном разрезе рис. 3(б) (сечение y, z , верхний рисунок) изображено поле давления в водной среде, а амплитудное распределение смещений частиц на границе и в глубине донного грунта – на нижнем рисунке. Волновой профиль донной поверхностной волны на границе имеет вид колец, расходящихся из центра и убегающих на периферию, фронты объемных сейсмических волн в глубине донной среды показаны чередующимися темными и светлыми полосами. Наличие непостоянства в периодичности структуры обязано немонотипности волнового состава и связано с интерференцией волн нескольких типов, бегущих с неодинаковыми фазовыми скоростями. Пространственное распределение в случае донной среды с параметрами повышенной жесткости и плотности относительно предыдущего случая существенно меняется, что служит предпосылкой возможности дистанционного сейсмоакустического диагностирования областей с различными упругими параметрами и перспективности «ближнеполюсного» зондирования в применении к задачам донной сейсморазведки.

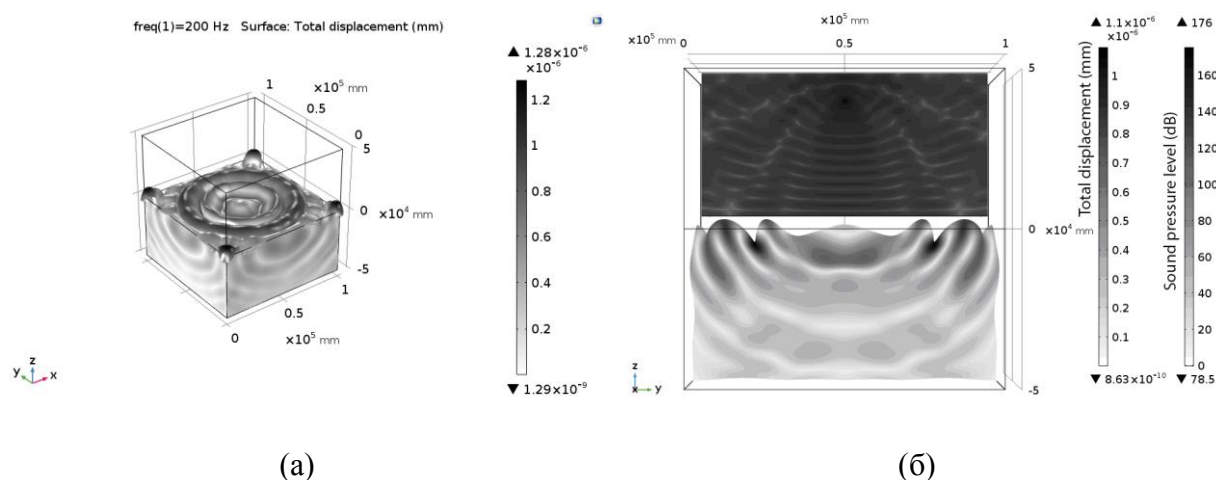


Рис. 3. Пространственное распределение волновых амплитуд. Монополь с частотой пульсаций $f = 200$ Гц: а – изометрия, б – вертикальный разрез поля акустического давления в воде (вверху) и поля упругих смещений в скальном донном грунте (внизу).

Глубина погружения монополя под свободную поверхность воды $h = 10$ м

На рис. 4(а, б) демонстрируется аналогичная волновая картина поля, соответствующая погружению монопольного источника на глубину $h = 40$ м. Максимум амплитуды в волновом рельефе на границе приходится на кольца с уменьшенным диаметром, что составляет характерное отличие от предыдущего случая в амплитудном пространственном распределении донных поверхностных волн, формирующих картину вблизи источника совместно с донно-сейсмическими объемными волнами, а также с гидроакустическим полем. Такое уменьшение радиуса колец волнового рельефа с максимальным откликом по амплитуде, образуемом поверхностной волной на границе, представляет собой характерный признак для источников всех типов при приближении их глубины установки к полной глубине в точке погружения на акватории.

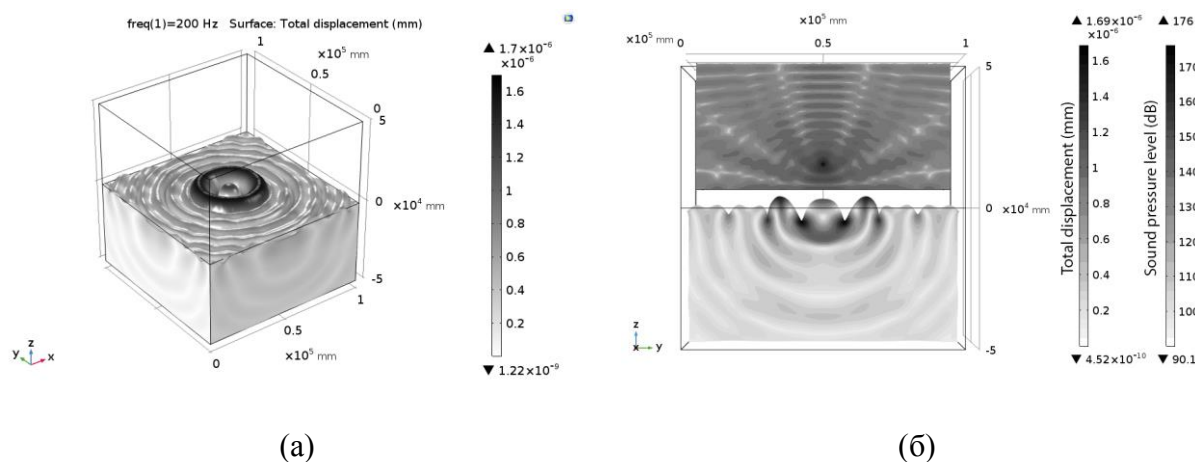


Рис. 4. То же что на рис. 3, при глубине погружения монополя под водную поверхность $h = 40$ м. Дно – скальный грунт

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В СЛОИСТОМ ДНЕ

Далее обратимся к результатам численного моделирования волнового поля в случае, когда в донной структуре (сложенный скальными породами) на незначительной глубине под границей вода-дно присутствует инородный маломощный рыхлый слой с плоскими горизонтальными границами. Предполагается рассмотреть волновое амплитудное распределение для гармонического излучения на нескольких частотах в интервале 100...200 Гц. Акустический монополь пульсирует в 10 м от границы жидкость-дно ($h = 40$ м) в бассейне, дно которого – скальный грунт ($\rho = 2.73$ г/см³, $c_l = 6.12$ км/с, $c_t = 3.08$ км/с). На глубине 6 м под дном залегает инородный пласт толщиной 4 м, сложенный из рыхлого материала (лесс – $\rho = 1.15$ г/см³, $c_l = 1.93$ км/с, $c_t = 0.77$ км/с).

На рис. 5(а) в изометрии представлено распределение по амплитуде колебательных смещений на границе жидкость-дно, а также в объемном сейсмоакустическом поле в донной среде на глубинах до 50 м при частоте пульсаций источника, равной 100 Гц.

На рис. 5(б) на вертикальном разрезе (сечение r, z -плоскостью) также представлено амплитудное распределение акустического давления в воде (вверху) и распределение амплитуды упругих смещений в сейсмоакустическом поле вглубь донной толщи и вблизи границы (внизу). В этом случае в волновом поверхностном рельефе возникает кольцевая структура с амплитудными вариациями по углу азимута. На границе с водой она уверенно прослеживается, несмотря на то, что максимальные амплитудные значения достигаются внутри заглубленного под границу слоя с пониженными плотностью и жесткостью. Данные моделирования свидетельствуют о возбуждении высших мод поверхностной и каналовой волн.

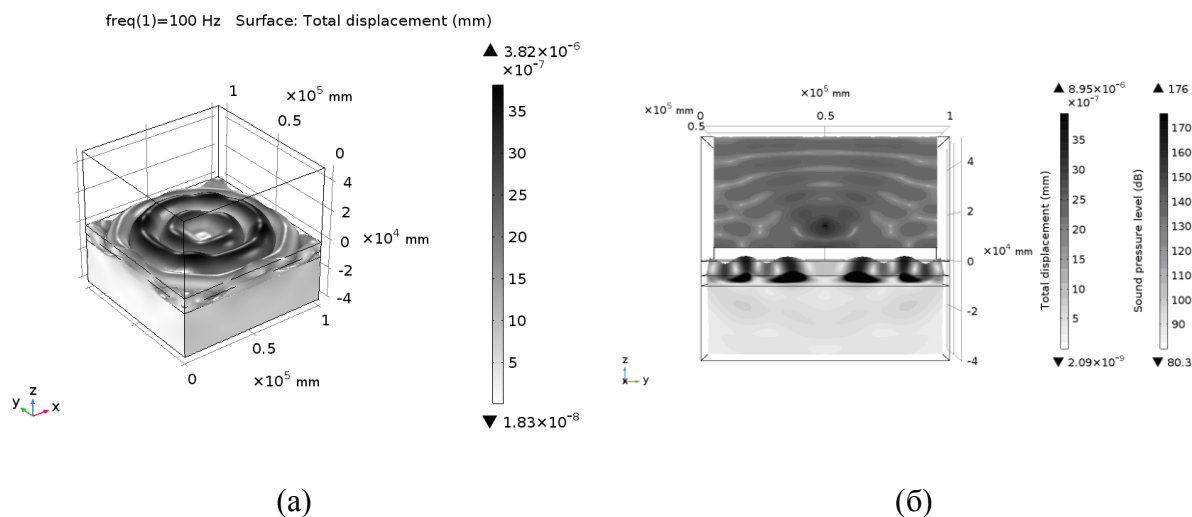


Рис. 5. а (изометрия) – пространственное распределение амплитуды упругих смещений в донном пространстве и на границе жидкость-дно, б – (сечение y, z , вертикальный разрез) (вверху) – распределение акустического давления в воде, (внизу) – амплитудное распределение упругих смещений в донном пространстве и на границе. Пласт 4 м, частота 100 Гц. Глубина погружения монополя под поверхность воды $h = 40$ м

Результаты моделирования волновой структуры при зондировании пласта толщиной 4 м для излучения на более высоких частотах даны на следующих иллюстрациях, представленных на рис. 6(а, б) для частоты 160 Гц и аналогично на рис. 7(а, б) – для частоты 200 Гц.

Здесь, как и в предыдущем случае, видно измельчение периода кольцевой структуры рельефа на границе с жидкостью, а также возникновение, либо наоборот, выглаживание периодических азимутальных вариаций по амплитуде, которые при перестройке вверх по частоте могут сменять друг друга. Эта особенность, как ранее уже указывалось, связана с возбуждением мод поверхностной и каналовой волн высших номеров. Характер-

ным масштабом периодичности концентрических колец рельефа являются линейные размеры порядка 8...10 м, сопоставимые с глубиной и толщиной инородного слоя.

Следовательно, анализ амплитудного распределения на границе вода-дно, обусловленного поверхностной волной, возбуждаемой гидроакустическим источником, установленным на расстоянии в десятков метров от границы, излучение которого перестраивается по частоте в некотором «подходящем» частотном интервале, позволяет рассматривать особенности волнового рельефа на поверхности в качестве признака присутствия в непосредственной близости от границы инородного слоя, сложенного из рыхлого материала.

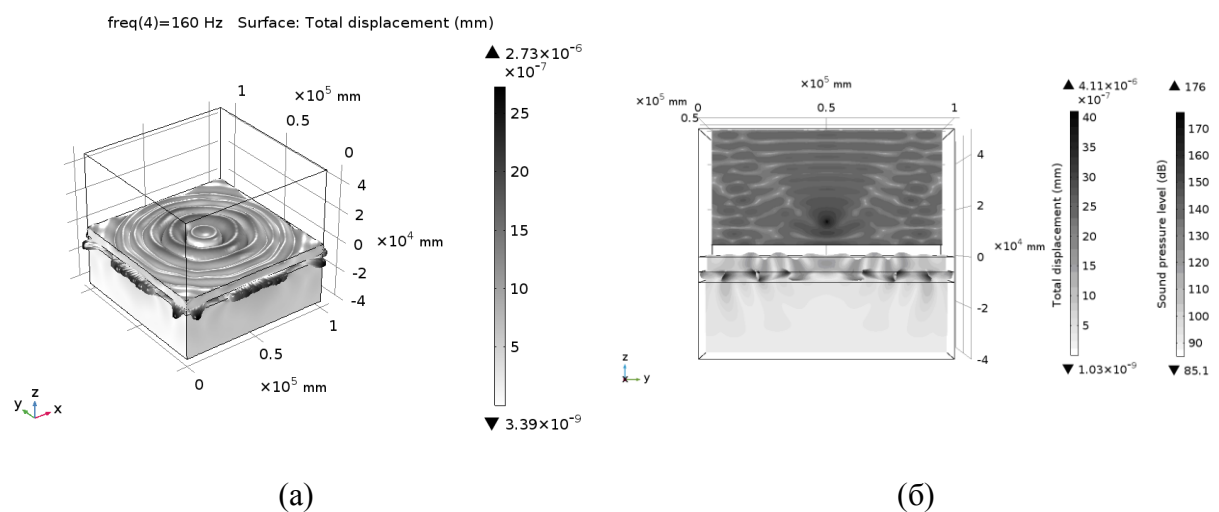


Рис. 6. То же что на рис. 5, частота излучения монополя 160 Гц

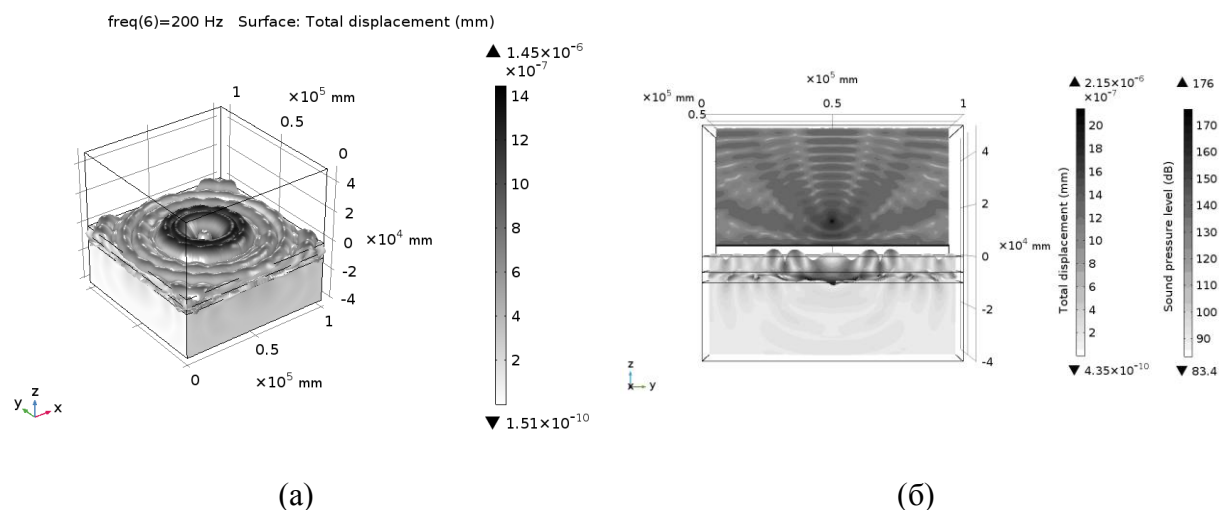


Рис. 7. То же что на рис. 6, частота излучения монополя 200 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности амплитудного распределения в поверхностной волне на границе водно-дно, проявляющиеся при плавной перестройке частоты в некоторой характерной частотной полосе, рассматриваются как предпосылки или признаки при диагностике присутствия маломощного инородного слоя в придонной области, а также подтверждают возможность оценки его толщины. Вместе с тем, в развитие изложенных результатов предполагается дальнейшая оптимизация способа регистрации сейсмических и гидроакустических сигналов и подробное обсуждение условий их применения. Реализация результатов проведенного моделирования имеет практическую перспективу в связи со все более широким внедрением в морскую сейсморазведку оптоволоконных планарных донных сейсмоприемных антенных решеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна широкополосными сигналами // *Океанология*, 2013, том 53, № 6, с. 843-850.
2. Бородин А.Е., Долгих А.Г., Долгих Г.И., Фищенко В.К. Регистрация сейсмоакустических сигналов надводного судна двухкоординатным лазерным деформографом // *Акуст. ж.*, 2016. 62, вып. 1, с. 59-69.
3. Jensen F., Kuperman W., Porter M., Schmidt H. *Computational ocean acoustics*. Springer, 2011.
4. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Численное моделирование донной волны, возбуждаемой на шельфе. Труды 21 научной конференции по радиофизике ННГУ, секция АКУСТИКА, с. 386-389, 2017, Нижний Новгород.
5. Лапин А.Д. Определение параметров грунта по дисперсионной кривой поверхностной волны // *Акуст. ж.*, 1993, 39, вып. 1, с. 181-183.
6. Biot M.A. The interaction of Rayleigh and Stonely waves in the ocean bottom // *Bull. Soc. Am.* 1952. V. 42. No 1. P. 81-93.
7. Скучик Е. Основы акустики. Т. 1, М.: Мир, 1976, 520 с.