© Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский, 2018, Океанологические исследования, 2018, Том 46, № 2, С. 88–95

УДК 534.26 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).8

# ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО- И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ДНА НА ШЕЛЬФЕ

**Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский**

*Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)*
*Россия 603950, Нижний Новгород, Ульянова ул., 46*
*Тел.: (831) 436-4764; Факс: (831)436-5745 e-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Представлены результаты трехмерного численного моделирования гидроакустического и донного сейсмического поля монополя, погруженного в воду на мелководье с целью зондирования донной среды. Для нескольких опорных частот в полосе 100–200Гц демонстрируются особенности структуры гидроакустических волн в жидкости, сейсмических волн в твердом дне и на границе раздела жидкость–дно. Показана возможность получения признаков, важных для дистанционной диагностики параметров придонных слоев на основе особенностей пространственного амплитудного рельефа, образуемого поверхностной волной на границе с водой.

**Ключевые слова:** донные, поверхностные, каналовые, волны, акустический, монополь, морская сейсморазведка

## Введение

Исследование возможности зондирования придонных пластов с пониженными плотностью и жесткостью, залегающих непосредственно под дном водного бассейна на шельфе, представляет собой актуальную задачу, вследствие сложностей, возникающих при обнаружении слабо разрешаемых слоев стандартными средствами морской сейсморазведки [1]. Численное моделирование в этом направлении с применением разных подходов [2] проводится многими авторами, при этом настоящее исследование выполняется с использованием конечно-элементного метода, реализуемого современными вычислительными средствами. В этой связи обратимся к результатам 3D-моделирования гидроакустической и донной сейсмической волн, генерируемых гидроакустическим источником и создающим квазигармонический сигнал, перестраиваемый в полосе частот 100–200 Гц. В качестве основных рассматриваются особенности поверхностной волны на границе раздела жидкость–дно и донной каналовой волны, сосредоточенной в области инородного донного слоя.

Представляет интерес путем моделирования проанализировать амплитудное волновое распределение сейсмосигнала на донной границе непосредственно под источником возмущения как в горизонтальной плоскости на границе раздела вода–дно, так и в вертикальном сечении интерфейса. 3D-моделирование применяется

как удобное средство демонстрации принципиальной возможности диагностики подповерхностной донной структуры – установления признаков наличия слоя с инородными (относительно окружающей донной толщи) характеристиками и получения оценочных данных о его параметрах (толщина, глубина залегания, плотность, скорость волн сжатия и сдвига) на основе регистрации указанных волн. При этом с использованием простейших моделей слоистой структуры (в приграничной области вода–дно) предполагается рассмотреть особенности рельефа, образуемого на границе амплитудным распределением поверхностной донной волны при перестройке частоты в некоторой «информативной» частотной полосе, для чего выбран незначительный по масштабам участок 100 х 100 м² указанной границы. Необходимо убедиться, что конфигурация волнового рельефа (или их стандартный набор для нескольких характерных – опорных частот) несет информацию об особенностях вертикального разреза (скоростной, плотностный и т.д.), что может подтвердить только принципиальную целесообразность развиваемого подхода.

Поскольку для выполнения надежного прогноза при разведке «на нефть» востребованы площади и глубины километровых масштабов, участок указанных размеров будет недостаточным, поэтому здесь не обсуждаются вопросы устройства и размещения планарной антенны гидрофонов или набор параллельных кос донных сейсмоприемников (вероятно, волоконно-оптико-акустических). Тем не менее, масштабы, выбранные в рассматриваемом случае для моделирования, вполне пригодны для решения задач поиска железо-марганцевых конкреций, «погребенных» в донных илистых отложениях. Безусловно, в применении к условиям реальных сейсмопоисковых разведочных работ на «углеводородную залежь» необходим охват обозреваемых площадей с километровыми масштабами по латерали. Можно предположить, что в этом случае при моделировании амплитудного волнового распределения сейсмосигнала на донной границе, следует перейти к более низкочастотному диапазону, сохраняя «принцип подобия», т.е. выбирая ту же величину отношения пространственного шага в расчетной области к длине волны. Не исключается использование средств, обладающих более высоким уровнем быстродействия и расширенной оперативной памятью. Не касаясь вопросов, связанных с указанной перспективой, далее обратимся к рассмотрению волновых рельефов, создаваемых одиночным монопольным акустическим источником, демонстрируемых в качестве примера, где 3D-моделирование успешно выполняется и адекватно задачам морской сейсморазвдки, решаемым на масштабе малой площади.

## Условия моделирования

Акустический монополь пульсирует в 10 м от границы жидкость-дно в бассейне глубиной 50 м, дно которого – скальный грунт ( $\rho$ = 2,73 г/см.³, $c_l$ = 6,12 км/с, $c_t$ = 3,08 км/с ). На глубине 6 м под дном залегает инородный пласт толщиной 1.5 м (другой вариант 4 м), сложенный из рыхлого пористого материала ($\rho$ = 1,15 г/см.³, $c_l$ = 1,93 км/с, $c_t$ = 0,77 км/с ).

## Результаты моделирования

Так, применительно к случаю частоты пульсаций источника равной 100 Гц, рыхлого пласта толщиной 1.5 м на рис. 1а в изометрии представлено амплитудное распределение акустического давления в воде (верхняя часть), в нижней части – распределение по амплитуде колебательных смещений на границе жидкость–дно, а также в объемном сейсмоакустическом поле в донной среде на глубинах до 50 м. На рис. 1б на вертикальном разрезе (сечение *r*, *z*-плоскостью) также представлено амплитудное распределение в сейсмоакустическом поле вглубь донной толщи и вблизи границы.

(а) (б)

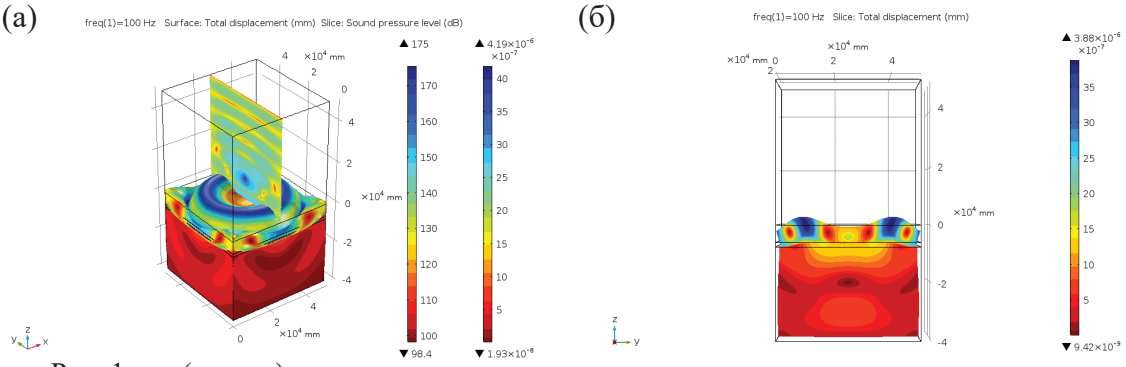



Рис. 1. а – (вверху) – пространственное амплитудное распределение акустического давления в воде, (внизу) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе жидкость–дно, б – (вертикальный разрез) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе. Пласт 1.5 м, частота 100 Гц.

При повышении частоты излучения меняется характер пространственного распределения амплитуды в обоих сечениях (горизонтальном и вертикальном), что проявляется в уменьшении пространственного периода в последовательности концентрических колец, образуемых пучностями в волновом рельефе на границе. Максимум амплитуды в пучностях приходится на кольца с несколько большим диаметром.

(а) (б)

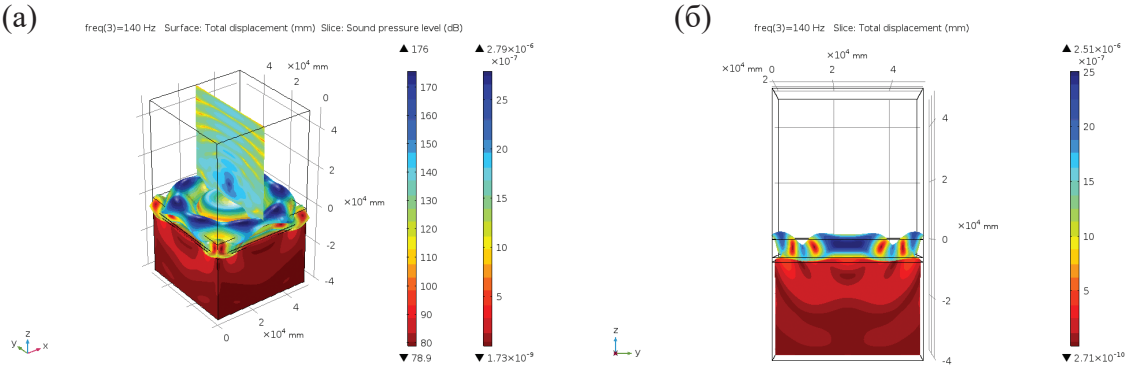



Рис. 2. а – (вверху) – пространственное амплитудное распределение давления в гидроакустическом поле, (внизу) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе жидкость–дно, б – (вертикальный разрез) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе. Пласт 1.5 м, частота 140 Гц.

Перестройка вверх по частоте также приводит к амплитудным вариациям вдоль азимутальной координаты. Сказанное подтверждается иллюстрациями на рис. 2а, б, на которых представлено пространственное амплитудное распределение в тех же сечениях, соответствующих частоте пульсаций 140 Гц, а на рис. 3а, б для частоты 200 Гц.

На основе сравнения амплитудных распределений можно предположить, что особенности волнового рельефа на границе (с учетом их совокупности в широкой полосе частот) следует рассматривать как важные признаки для дистанционной диагностики донной среды.

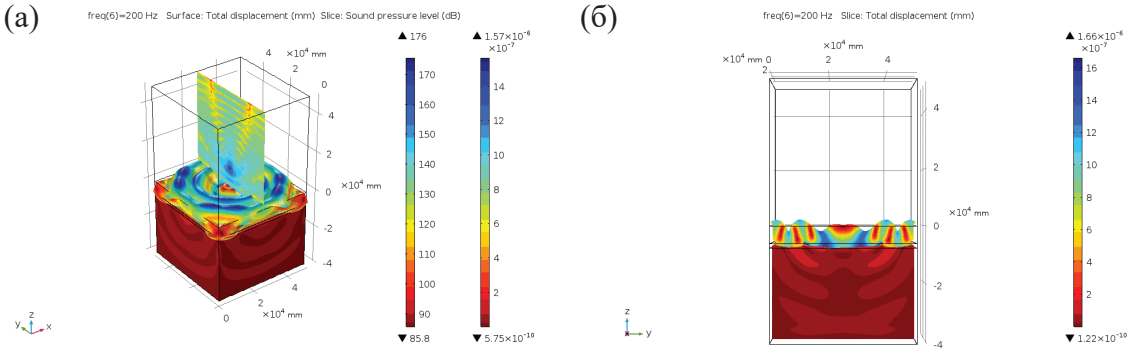



Рис. 3. То же, что на рис. 1 и на рис. 2. Пласт толщиной 1.5 м, частота 200 Гц.

Аналогично изложенному выше, на рис. 4а представлено амплитудное распределение акустического давления в воде (верхняя часть) применительно к случаю зондирования пласта толщиной 4 м, а в нижней части – распределение по амплитуде колебательных смещений на границе жидкость–дно и в сейсмоакустическом поле в донной среде. В этом случае уже на самой низкой частоте излучения – 100 Гц – в исследуемой полосе в волновом поверхностном рельефе (расчетная область по горизонтали охватывает те же пределы 100 х 100 м²) возникает кольцевая структура с большим числом колец с более мелким периодом, кроме того, присутствуют амплитудные вариации по углу азимута. На рис. 4б на вертикальном разрезе (сечение *r*, *z*-плоскостью) представлено амплитудное распределение в сейсмоакустическом поле вглубь донной толщи и вблизи границы. На границе с водой кольцевая структура 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.

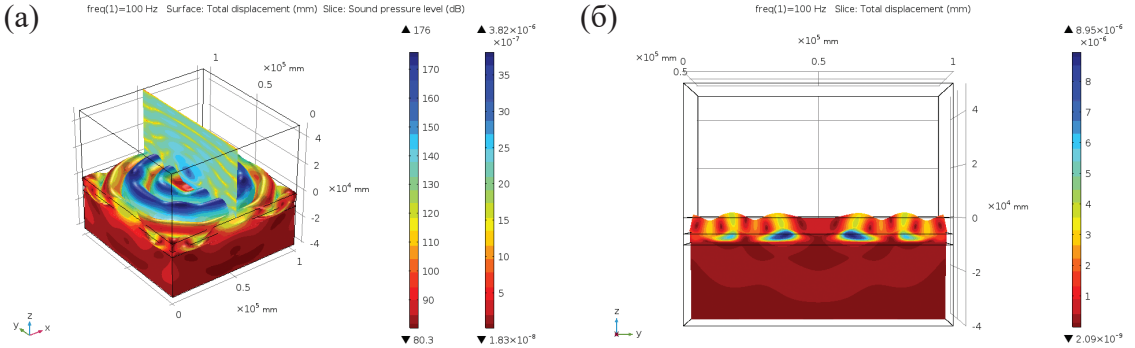



Рис. 4. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 100 Гц.

Результаты моделирования волновой структуры при зондировании более мощного пласта – толщиной 4 м – для излучения на более высоких частотах даны на следующих иллюстрациях, представленных на рис. 5а, б для частоты 160 Гц и аналогично – на рис. 6а, б для частоты 200 Гц.

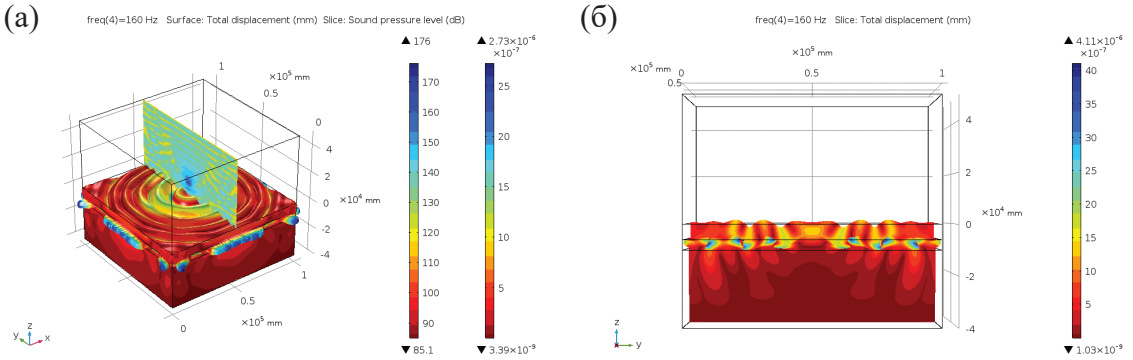



Рис. 5. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 160 Гц.

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. Сравнивая данные визуализации амплитудного распределения применительно к случаям зондирования придонного пространства с заглубленным рыхлым пластом разной толщины – 1.5 м и 4 м, можно видеть неодинаковую изменчивость волнового рельефа, возникающую при частотной перестройке при различии в мощности придонного слоя.

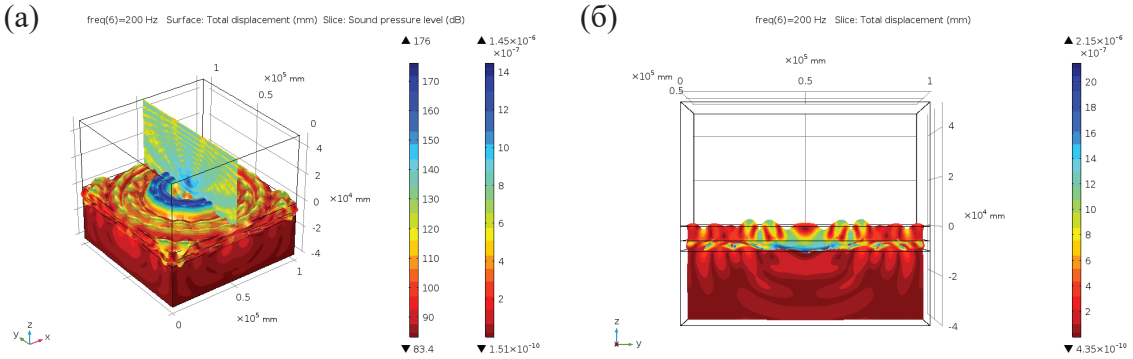



Рис. 6. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 200 Гц.

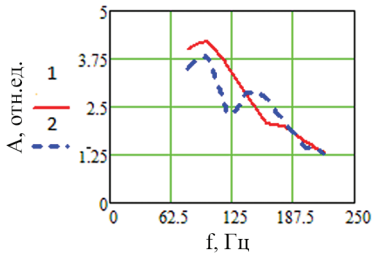
Так, в рамках грубой оценки, характерным масштабом периодичности концентрических колец рельефа в случае тонкого прослоя являются линейные размеры порядка 10 м и более, а для более мощного – менее 8–10 м, причем как по радиальной, так и по азимутальной координате.

Следовательно, анализ амплитудного распределения на границе вода–дно, обусловленного поверхностной волной, возбуждаемой гидроакустическим источником, установленным на расстоянии в десяток метров от границы, излучение

которого перестраивается в полосе частот 100–200 Гц, позволяет рассматривать особенности волнового рельефа на поверхности в качестве признака присутствия инородного слоя, сложенного из рыхлого пористого материала, в непосредственной близости от границы. Ввиду изложенного выше, возможна ориентировочная оценка толщины пласта и глубины его залегания.

В дополнение к изложенному, численное моделирование, выполненное при частотной перестройке гидроакустического излучения, показало, что изменение амплитудного уровня поверхностной волны с частотой также может рассматриваться в качестве признака при оценке толщины и глубины залегания такого пласта под донной границей.

На рис. 7 представлена зависимость максимального амплитудного отклика в возбуждаемой поверхностной волне от перестраиваемой частоты (в полосе 100–200 Гц) в случаях слоя малой мощности (1.5 м – кривая 1) и для более мощного слоя (4 м – кривая 2). В полосе перестройки для слабо разрешаемого слоя (1) имеется единственный максимум вблизи частоты ~90 Гц, в то время как для более мощного (2) – таких максимумов два, которые соответствуют двум резонансам вблизи частот ~90 Гц и ~150 Гц.




Гц

Рис. 7. Частотная зависимость максимального амплитудного отклика поверхностной волны. Амплитуда в относительных единицах.

## Заключение

Амплитудное распределение поля акустического давления в воде и волновых смещений на границе вода–дно и в твердой донной среде, порождаемые гидроакустическим источником, получены при трехмерном численном моделировании (конечно-элементный метод) и демонстрируются на ограниченном масштабе – в пределах 100 x 100 м². Простейшая мелкослоистая модель скоростного разреза донной среды и незначительный по масштабам участок указанной границы используется исключительно в методических целях демонстрации возможности выявления признаков, полезных для диагностирования прослоев с пониженной скоростью, присутствующих в придонной области.

В дальнейшем в развитие излагаемого подхода представляет интерес обсуждение особенностей, привносимых за счет применения группирования гидроакустических источников с различной их взаимной фазировкой.

Особенности амплитудного распределения на границе вода–дно, соответствующие нескольким «опорным» частотам в полосе 100–200 Гц, и характер зависимости уровня волнового отклика при плавной перестройке частоты, рассматриваются как предпосылки или признаки при диагностике присутствия маломощного слоя в придонной области, а также подтверждают возможность оценки его толщины. Существуют определенные перспективы, позволяющие считать возможной практическую реализацию результатов проведенного моделирования, что связано со все более широким внедрением в морскую сейсморазведку оптоволоконных планарных донных сейсмических антенных решеток. Вместе с тем реальные масштабы, используемые в морской донной сейсморазведке, превышают моделируемые в настоящей работе на порядки. Поэтому необходимо дальнейшее развитие изложенных результатов, предполагается оптимизация способа регистрации сейсмических и гидроакустических сигналов и дальнейшее обсуждение условий их применения.

## Литература

*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. Т. 53. № 6. С. 843–850.

*Jensen Finn B., Kuperman William A., Porter Michael B.* Schmidt Henrik Computation Ocean Acoustics. Springer. 2011.

# THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF HYDRO AND SEISMIC-ACOUSTIC WAVES BY SHELF BOTTOM PROFILING

**Yu.M. Zaslavsky, V.Yu. Zaslavsky**

*Institute of applied physics Russian academy of science (IAP)*
*Russia 603950, Nizhny Novgorod, Ul'janov Str., 46*
*Tel.: (831) 436–4764; Fax: (831) 436-5745 e-mail: zaslav@appl.sci-nnov.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

3D numerical simulation of hydro and seismic waves generated by acoustic monopole submerged in shallow water for seismic profiling of bottom medium is demonstrated. Peculiarities of hydroacoustic waves in the water, seismic field configuration in the bottom interior and fluid-solid interface are presented at several frequencies of the bound 100–200Hz. Capability of remote diagnostics of the subsurface layers lying immediately under the bottom is analyzed. The diagnostic signs are found in the features of amplitude spatial relief formatting with surface wave on fluid-solid interface.

**Keywords:** bottom, surface, channel, waves, acoustic, monopole, sea, seismic, prospecting

## References

*Lazarev V.A., Malekhanov A.I., Merklin L.R., Romanova V.I., Talanov V.I., and Hil'ko A.I.* Kogerentnoe seismoakustitcheskoe profilirovanie morskogo dna shirokopolosnymi signalami. *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 843–850.

*Jensen Finn B., Kuperman William A., Porter Michael B., and Schmidt Henrik* Computation Ocean Acoustics, Springer. 2011.