

### 3D ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ПЛАВНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ОСАДОЧНОЙ ДОННОЙ ТОЛЩЕ

Ю.М. Заславский<sup>1)</sup>, В.Ю. Заславский<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт прикладной физики РАН

<sup>2)</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского

#### **Введение**

Донные пограничные волны Рэлея–Шолте (поверхностный тип волн), распространяющиеся в мелководной акватории, исследуются в ряде работ [1-3] при упругих параметрах, неизменных вглубь дна. В работе [4] теоретически анализируются характеристики поверхностных волн нерэлеевского типа, распространяющихся с низкими скоростями вдоль границы в условиях плавной стратификации донной среды.

При исследовании предполагается гидроакустический бассейн 25 м глубины, в котором монополь, погруженный в воду на глубину 15 м, приподнят над дном на 10 м и излучает одиночные видео импульсы гауссовой формы длительностью 5 мс. Амплитудные характеристики монополя не представлены, поскольку в линейном приближении они не существенны для анализа. Используются две модели стратификации дна, позволяющие выполнить сравнительный анализ.

#### **Первая модель донной среды и волновые отклики**

Первой рассматривается модель, в которой стратификация дна имеет вид, подобный рассмотренному в [4]: модуль Юнга нарастает вглубь по линейному закону  $E \sim \text{const} \cdot z$ , причем квадрат скорости волн сдвига с глубиной также растет линейно, коэффициент Пуассона монотонно падает, а остальные параметры остаются постоянными  $\rho = \text{const}$ ,  $c_l = \text{const}$ . Ниже горизонта на глубине  $z = 25$  м все параметры донной среды остаются неизменными, равными достигнутому значениям.

На рис.1 представлена плоскость, на которой синтетические волновые отклики располагаются в виде «строчка под строчкой». Предполагается, что сигналы регистрируются донными сейсмическими либо гидроакустическими датчиками давления в пунктах, расположенных последовательно и эквидистантно вдоль линии вблизи границы на удаление от источника с шагом 5 м. Донные – заглублены в сторону дна, гидроакустические – в сторону жидкости. По первым вступлениям импульсов-откликов строятся волновые годографы, на основе которых выполняется интерпретация полной волновой совокупности, генерируемой пульсирующим источником. Принадлежность проходящих волн тому или иному типу можно интерпретировать с помощью годографов, по которым определяется скорость распространения. Скорость вычисляется как тангенс угла наклона линий, соединяющих моменты вступления в ближайшие точки регистрации волновых импульсов, соответствующих одинаковым фазам колебаний на осциллограммах, которые представлены в виде «строчка под строчкой». Годограф №1, представленный жирной прямой на рис.1, проведен по первым вступлениям импульсов, проходящих по времени раньше других и образующих линию с наклоном, соответствующим скорости распространения  $c = 1500$  м/с.

Этот годограф отождествляется с гидроакустической волной. Следующий импульс (вместе с аналогичными, поступающими на соседние датчики), приходящий с увеличенной задержкой по времени на ближайший к источнику датчик, образует годограф №2. Годограф №2 характеризуется более крутым наклоном и соответствует пограничной волне Рэлея-Шолте, распространяющейся со скоростью  $c_{R-Sch} = 2600 \text{ м/с}$ . Третий годограф №3 образуется совокупностью импульсов, подобных второму (и аналогичными на соседних датчиках), но с интервалом в задержке относительно второго  $\tau \approx 15 \text{ мс}$ . Импульсы двух последних (№2, №3), имеющие полярность, противоположную гидроакустическому, образуют дублет волн Рэлея-Шолте. Волны в дублете, распространяясь с более высокой скоростью, догоняют гидроакустическую на некоторой дистанции от источника.

### ***Вторая модель донной среды и волновые отклики***

Далее рассматривается вторая модель с несколько другим видом стратификации дна, чем представленная выше. Предполагается, что коэффициент Пуассона в дне остается постоянным и соответствует случаю водоподобной среды, а квадрат скорости распространения обеих волн (продольных и поперечных) линейно нарастает с глубиной, при этом на границе с водой имеет место скачок скорости продольных волн, что является идеализацией. Параметры дна принимают следующие значения: плотность  $\rho = 2.73 \text{ г/см}^3$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.49$ , кроме того, предполагается, что  $c_l^2 = 102 \cdot 10^2 \cdot z$ ,  $c_t^2 = 2 \cdot 10^2 \cdot z$ , где координата  $z$  имеет своим началом границу вода-дно, а соответствующая ось направлена вглубь донной толщи. На глубине 25 м под указанной границей скорости упругих волн достигают значений  $c_l = 504.975 \text{ м/с}$ ,  $c_t = 70.7 \text{ м/с}$  и остаются постоянными.

На рис.2 демонстрируется волновое поле в виде набора синтетических сейсмограмм, построенных по результатам моделирования осциллограмм-откликов на акустическое импульсное воздействие монополя в условиях второй модели. Сейсмограммы, соответствуют волновым откликам (акустическое давление), регистрируемым в приемных точках, расположенных в жидкости (на удалении 0.5 м от донной границы) последовательно в линию с шагом 5 м. Годографы №2 и №3 соответствуют приходу пары волн Рэлея-Шолте со скоростью распространения 2600 м/с. Близость значений скорости волн поверхностного типа для обеих моделей дна свидетельствует о доминирующем вкладе сдвиговой упругости, поскольку основное различие в условиях генерации волн заключено в неодинаковой упругости среды в этих моделях на объемное сжатие, влияющей на скорость продольных волн, при этом поперечная податливость не затронута. Длительность взаимной задержки импульсов в дублете равна 20 мс и совпадает со временем прохождения водного бассейна глубиной 25 м вверх и вниз с указанной скоростью. Каждая пара представляет собой импульсы, инвертированные один по отношению к другому по форме, в отличие от предыдущего случая, в котором импульсы в дублете сфазированы. Такая особенность должна быть принята во внимание, поскольку указывает на возможность использования в качестве признака диагностики характера стратификации дна.

### Сравнительный анализ

Общим свойством, характерным для обеих моделей стратификации, является различие в скорости спада амплитуды (или уровня) гидроакустических волн и волн Шолте по мере распространения. Гидроакустическая волна, несмотря на отсутствие диссипации, не принимаемой во внимание в расчетах (при моделировании), спадает достаточно резко. Волны Шолте при распространении спадают заметно медленнее и уже на последних отрезках траектории доминируют по уровню над импульсами гидроакустической волны. Гидроакустическая волна является объемной, уходящей вглубь, в отличие от поверхностного типа волн дублета, припасованных к границе. Это еще одна особенность, которая указывает на возможность использования волн Шолте в качестве признака диагностики присутствия источника волновых возмущений, локализованного в некоторой точке в прибрежной акватории, что отмечалось и в других исследованиях.

Анализ вышеизложенных вопросов с использованием моделей, в которых плавная стратификация распространяется на более глубокие горизонты, показывает наличие особенностей, требующих обсуждения в последующих работах.

Важно отметить специфику результата, полученного при численном моделировании на примере малоглубинного бассейна. Показано присутствие дублета пограничных волн, распространяющихся с более высокой скоростью, чем гидроакустические. Выявленные особенности могут найти практическое применение. Так, по точке пересечения годографов, соответствующей одномоментному приходу волн разных типов, определяется глубина погружения источника. Величина временной задержки волн в дублете используется при реконструкции донного строения и диагностике его упругих параметров.

### Заключение

В итоге, по результатам 3D-численного моделирования и путем построения годографов на поле синтетических сейсмограмм показано, что монополюсом, пульсирующим в акватории шельфа, возбуждается гидроакустическая волна и пара (или дублет) дон-

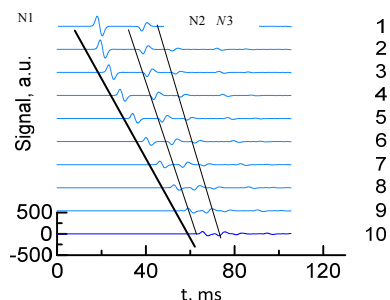


Рис. 1

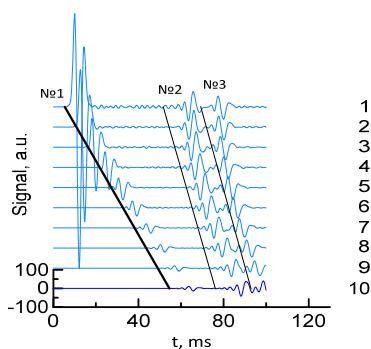


Рис. 2

ных пограничных волн Рэлея-Шолте. Генерация волн Шолте происходит как в условиях скального грунта, так и при наличии в донной среде осадочного рыхлого слоя, имитируемого плавной стратификацией упругих параметров, нарастающих по величине в глубину. Моделирование пограничных волн выполнено на примере донной среды с двумя видами скоростных разрезов. Можно прийти к заключению, что для решения задач дистанционного зондирования среды, а также для обнаружения мало-заметных источников в прибрежной акватории и удаленного контроля за их пространственным перемещением, необходима селективная регистрация волн каждого типа. Моделирование с использованием типичных для мелководной акватории физических характеристик донной толщи, распределения глубин в шельфовых районах и последующий анализ гидроакустических и пограничных волн с выделением информативных волновых признаков позволит определить необходимые их связи с диагностируемыми параметрами среды и источников, что обеспечит надежную основу для выработки алгоритмов, используемых в морской сейсморазведке (дистанционное зондирование) и в задачах удаленного контроля.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2019-0019).

#### *Список литературы*

- [1] Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. // Подводные исследования и робототехника. 2018. №2 (26).
- [2] Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. // Прикладные технологии гидроакустики и ... 2018. – elibrary.ru
- [3] Акопов С.С., Акопова Е.А., Григорьев А.Г. // Вопросы инженерной ... 2016. – elibrary.ru
- [4] Годин О.А. // Акуст. журн. 2007. Т.53, вып.6, С.809

