АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 54, № 3, с. 426–430

АКУСТИКА ОКЕАНА, ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.88; 551.463.26

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕНТИЧЕСКОГО ФРОНТА НА МОДОВУЮ СТРУКТУРУ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОКЕАНЕ

© 2008 г. П. Н. Кравчун

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

119899 Москва ГСП-2, Ленинские горы

Факс: (495) 932-8820; E-mail: gedackt@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.07 г.

Рассматриваются особенности модовой структуры низкочастотного звукового поля в океане при наличии бентического фронта, представляющего собой границу раздела между Антарктической донной водой и глубинной водой. Для описания гидрологических характеристик бентического фронта использованы данные Международного эксперимента WOCE. На основе математического моделирования дана оценка изменений, вносимых бентическим фронтом в значения фазовых, групповых скоростей и вертикальную структуру мод в диапазоне частот 5–20 Гц. Рассмотрены возможности реконструкции гидрологических характеристик фронта методами модовой томографии океана.

PACS: 43.30.+m; 92.10.Vz

Бентический фронт (БФ) относится к классу квазистационарных термохалинных океанических фронтов глобального масштаба, он представляет собой границу раздела между Антарктической донной водой (ААДВ), формируемой главным образом в море Уэдделла, и глубинной водой. Распространяясь вместе с Антарктическим Циркумполярным течением, ААДВ по глубоководным проходам проникает в придонную область Атлантического, Индийского и Тихого океана, занимая все глубоководные структуры дна. Главными особенностями БФ являются: большая глубина залегания фронтальной зоны (от 2000 до 5000 м); почти горизонтальное расположение фронтальной поверхности, имеющей планетарный масштаб; относительно небольшая толщина термо-, хало- и пикноклинов, соответствующих фронту (200–500 м), в которых, тем не менее, наблюдаются значительные вертикальные градиенты гидрологических характеристик (в частности, градиент температуры может достигать 1.5–2°С/км, что сопоставимо с температурными градиентами в "Северной стене" Гольфстрима).

Бентический фронт исследован относительно слабо, что обусловлено большой глубиной его залегания. Тем не менее, помимо нескольких опубликованных работ по гидрологии БФ (см., например, [1, 2]), значительная информация может быть получена из анализа итоговых данных Международного эксперимента WOCE (World Ocean Circulation Experiment). В данной работе были использованы данные эксперимента WOCE, предоставленные автору Р. Шлитцером (Германия).

Анализ профилей гидрологических характеристик, полученных в ходе указанного эксперимента в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах, показывает, что наиболее выраженный БФ наблюдается в Бразильской и Гвианской котловинах, в котловине Агульяс и в ряде трансформных разломов Южно-Атлантического хребта в Атлантическом океане, в Мозамбикской котловине и котловине Крозе в Индийском океане, а также в Южной котловине и трансформных разломах Чилийского поднятия в Тихом океане. Эти результаты в целом позволяют придти к выводу о том, что БФ сильнее всего проявляется в районах интенсификации движения ААДВ (трансформных разломах, глубоководных проходах), а также в глубоководных котловинах Мирового океана, где наблюдается интенсивная циркуляция ААДВ. Характерные профили температуры и солености в районе с выраженным БФ (Атлантический океан, Бразильская котловина) приведены на рис. 1. Отметим, что в Тихом океане, в отличие от Атлантики, соленость при переходе в слой ААДВ увеличивается, поскольку соленость Тихоокеанской глубинной воды несколько ниже солености ААДВ и существенно ниже солености Атлантической глубинной воды, в результате чего влияние БФ на профиль скорости звука в Тихом океане несколько меньше, чем в Атлантике.

До настоящего момента были даны численные оценки влияния бентического фронта лишь на лу-

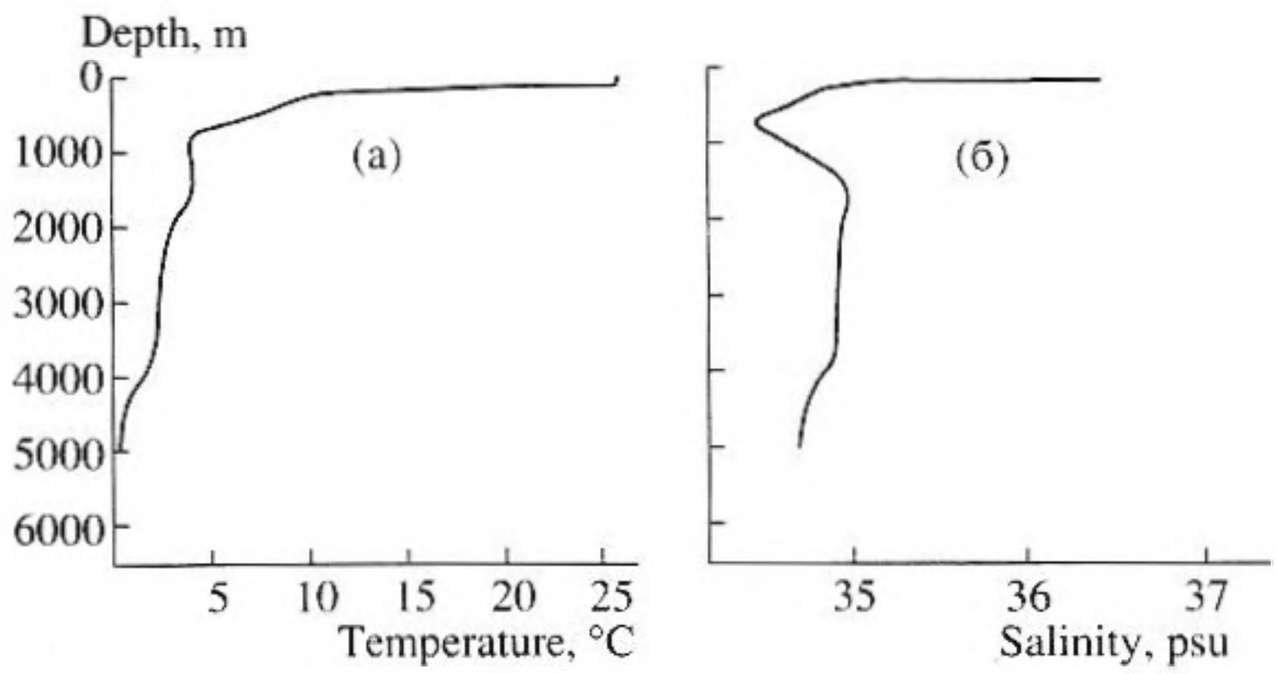

Рис. 1. Зависимость температуры и солености от глубины для района с отчетливо выраженным бентическим фронтом (Атлантический океан, северо-запад Бразильской котловины: 30.5 W/5.067 S, разрез 05MT22/2 эксперимента WOCE).

чевую картину звукового поля в океане (на примере Тихого океана, где БФ выражен умеренно) [3]. Вопрос о влиянии фронта на модовую структуру поля не рассматривался. Между тем, для анализа особенностей низкочастотных полей в открытом океане, где может встретиться сильно выраженный БФ, этот вопрос представляет несомненный интерес.

В данной работе даны оценки воздействия бентического фронта на модовую структуру акустического поля. Для математического моделирования использована модель океанического волновода в виде водного слоя постоянной глубины, лежащего на полупространстве однородного жидкого дна с параметрами, характерными для абиссальных равнин (отношение плотностей грунта и воды – 1.3, скорость звука в грунте – 1595 м/с).

Расчет нормальных волн производился с помощью метода Рунге–Кутта 4-го порядка. Вычисления, проведенные для диапазона частот 5–20 Гц, показали, что БФ, как и следовало ожидать, влияет на моды относительно высоких порядков: его влияние, например, для частоты 10 Гц начинает проявляться, как правило, на 6–7-й модах, достигает максимума для мод 9–11 порядков и затем ослабевает. С ростом частоты порядки мод, на которые эффективно влияет БФ, увеличиваются (например, на частоте 20 Гц БФ сильнее всего воздействует на моды 18–28 порядков). При этом влияние фронта на пространственную структуру мод локализовано на глубинах, близких к глубинам его залегания, и заключается прежде всего в пространственном "растяжении" вертикального распределения звукового давления на указанных глубинах, т.е. фактически в сдвиге экстремумов давления в область бóльших глубин (рис. 2). Сдвиг экстремумов по глубине может достигать 200–300 м, причем для мод достаточно высокого порядка он составляет почти четверть пространственного "периода" вертикального распределения моды (см. график Б на рис.2). Изменения фазовых и групповых скоростей мод, вызванные наличием БФ, превышают для некоторых мод 6 м/с. Весьма важно, что, несмотря на большую глубину залегания фронта, его влияние на вертикальную модовую структуру поля сосредоточено в водной толще и практически не затрагивает звуковое поле в толще дна (БФ эффективно влияет на моды тех порядков, глубина проникновения которых в дно невелика). Расчеты показывают, что даже значительные изменения параметров дна влияют на моды 9–12 порядков на частоте 10 Гц (на распределение звукового давления в водном слое, фазовые и групповые скорости) в гораздо меньшей степени, чем БФ. Это свидетельствует о том, что изменчивость параметров дна вдоль трассы не может сколь-нибудь существенно "замаскировать" воздействие БФ на модовую структуру поля.

Обратимся к вопросу о возможности реконструкции гидрологических характеристик бентического фронта методами акустической томографии. Эта задача представляет особый интерес из-за труднодоступности фронта для исследований in situ. Как было указано, БФ может заметно изменить скорости распространения мод, что открывает возможности его исследования методами модовой томографии. Увеличение времени распространения мод 9–12 порядков на частоте 10 Гц, вызванное наличием БФ, достигает 50 мс на расстояниях от 10 до 70 миль от излучателя (в зависимости от номера моды). При этом разность времен прихода мод указанных порядков в точку приема достигает 50 мс при длине трассы от 13 до 19 миль (в зависимости от выбранной пары мод), т.е. расстояние разделения мод не слишком велико. Эти особенности задачи дают возможность применить методы дифференциальной модовой томографии.

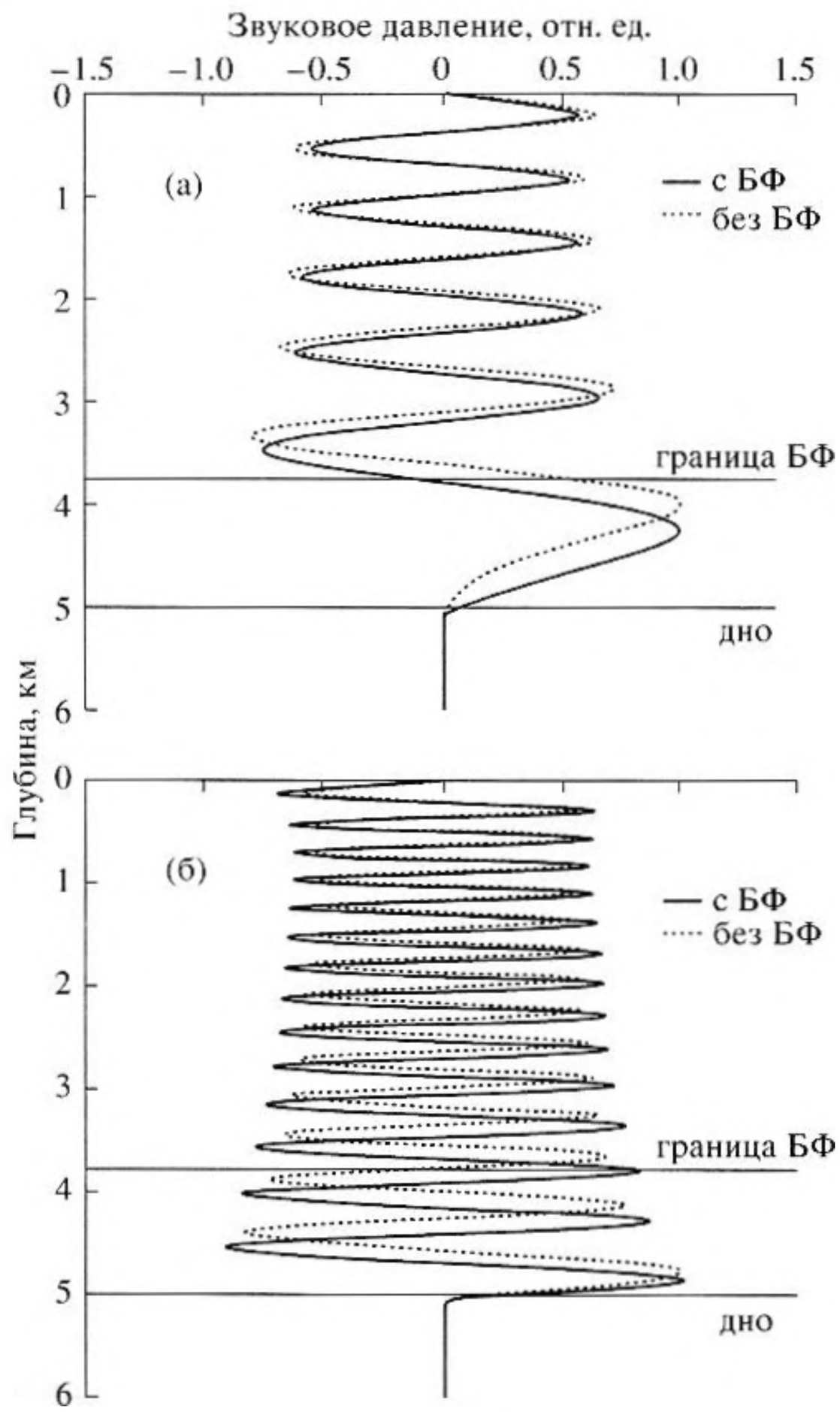

Рис. 2. Распределение звукового давления по глубине для мод 11-го порядка на частоте 10 Гц (график а) и 28-го порядка на частоте 20 Гц (график б): сплошная кривая – при наличии бентического фронта, пунктирная кривая – без БФ (расчет на основе экстраполяции профиля c(z) по значениям grad c в глубинной воде).

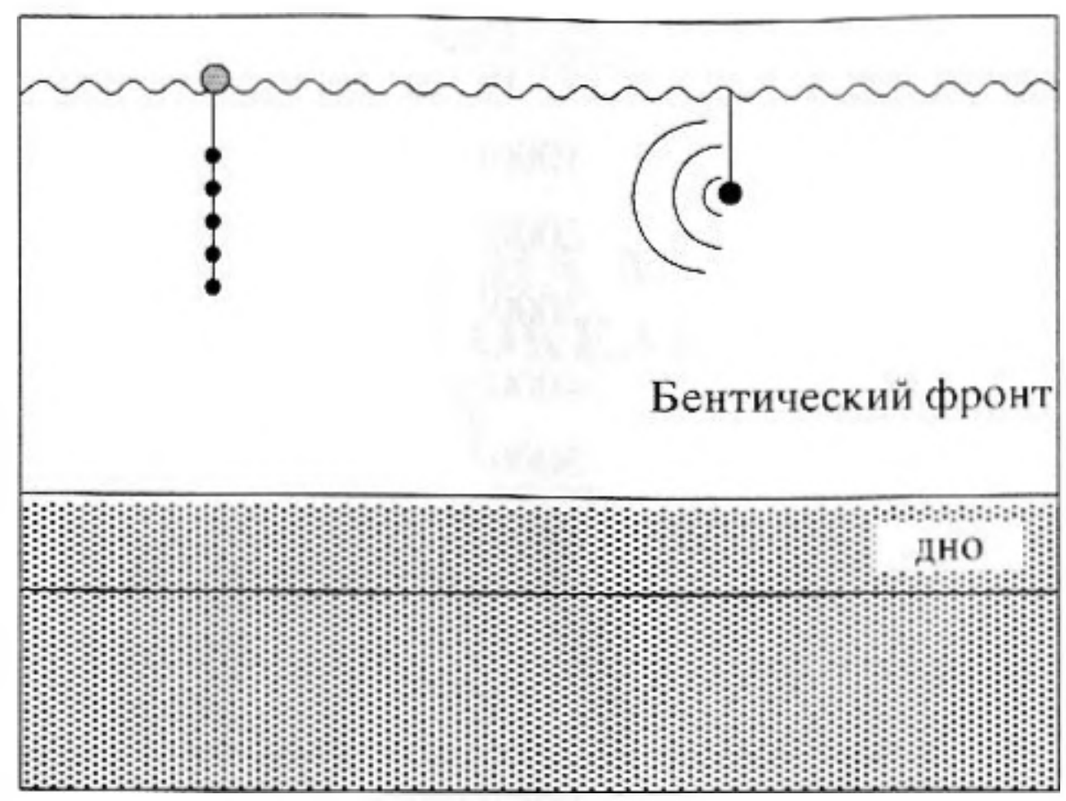

Рис. 3. Схема томографической системы.

Воспользуемся традиционной схемой модовой томографии океана (рис. 3): излучатель располагается на глубинах, близких к максимумам звукового давления в выбранных модах, приемная антенна может состоять из нескольких гидрофонов, расположенных на близких глубинах. Выбор оптимальных глубин погружения излучателя и приемной антенны в рассматриваемой задаче существенно облегчается тем обстоятельством, что БФ, как было указано, слабо влияет на вертикальное распределение звукового давления в модах на горизонтах выше изучаемой фронтальной зоны. Для гидрологии Бразильской котловины и мод порядков 9–11 (рабочая частота 10 Гц) наименьшая из оптимальных глубин погружения излучателя и центра приемной антенны составляет 250–300 м, однако более предпочтительны глубины 550–600 м, расположенные ниже весьма изменчивого поверхностного слоя (именно эти глубины были использованы при численном моделировании). Расстояние между излучателем и приемной антенной (длина трассы) составляло в расчетах около 70 миль, что обеспечивало уверенное разрешение мод и определение искомых временных или фазовых задержек. Как показал анализ данных эксперимента WOCE, изменчивость профилей гидрологических характеристик на трассах такой длины в районах котловин, где отчетливо выражен БФ, незначительна.

Математическое моделирование было проведено тремя методами: фазовой томографии, импульсной томографии (алгоритмы методов приведены в [4]) и методом согласованного поля (в последнем случае требуется протяженная антенна, однако длина трассы может быть существенно меньше). Искомое возмущение $S(z)$, вносимое фронтом в профиль скорости звука, было представлено в виде линейного разложения по пробным функциям, близким к структуре ожидаемой неоднородности (использовалось два типа разложения):

$$c(z) = c_0(z) + S(z), \quad S(z) = \sum_{n=1}^{4} a_n (z - z_0)^n,$$

$$S(z) = \sum_{n=1}^{3} a_n \operatorname{th}[nl(z - z_0)],$$

где $c_0(z)$ – опорный профиль скорости звука (без учета БФ, экстраполяция по значениям grad c в глубинной воде), a_n, l – варьируемые коэффициенты, z_0 – варьируемая глубина верхней границы бентической фронтальной зоны.

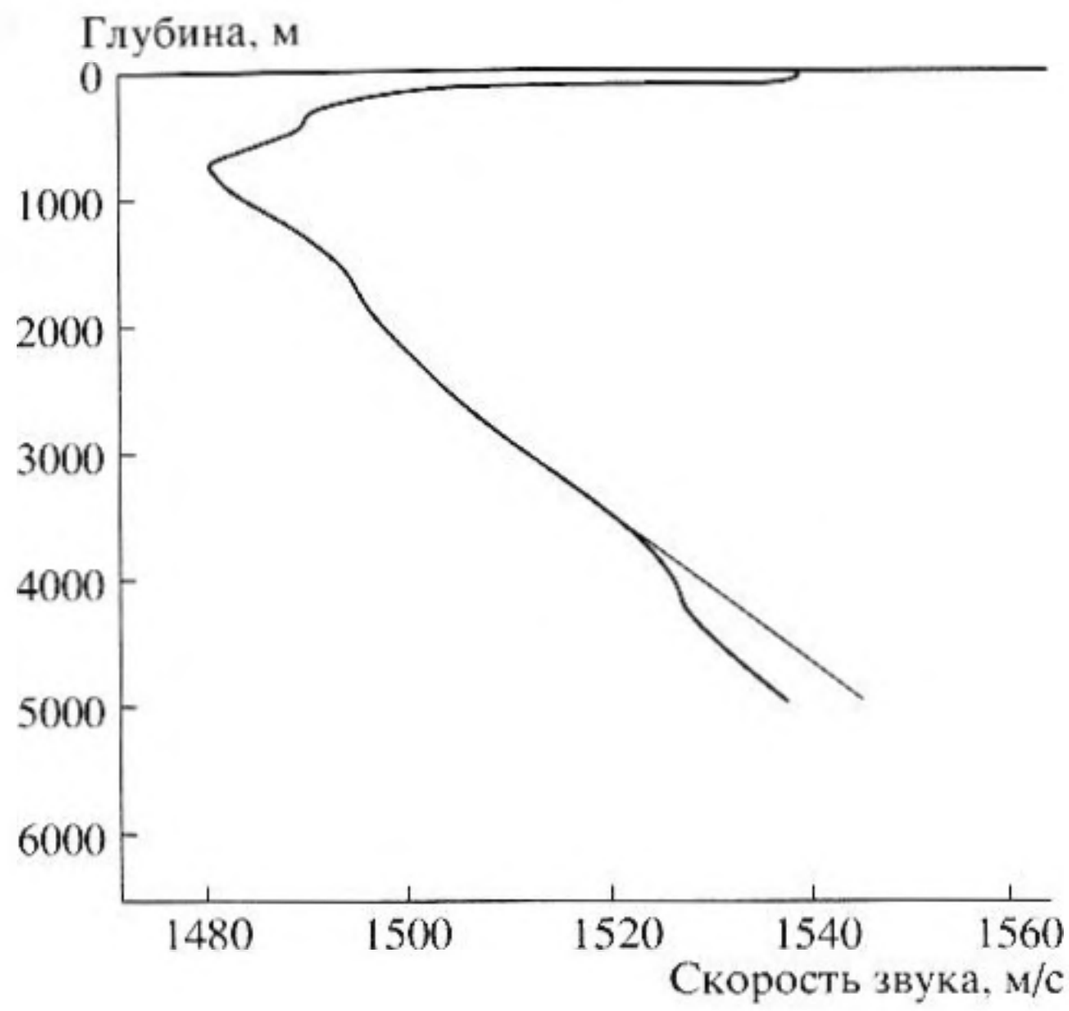

Рис. 4. Зависимость скорости звука от глубины (северо-запад Бразильской котловины): толстая линия – эксперимент WOCE и совпадающий с этой кривой восстановленный профиль, тонкая линия – опорный профиль (экстраполяция по значениям gradc в глубинной воде).

Системы уравнений, позволяющие реконструировать гидрологию фронта, являются в общем случае неустойчивыми. В рассматриваемой задаче решение оказалось неустойчивым по отношению к априорному заданию глубины верхней границы бентической фронтальной зоны. Эта неустойчивость, к сожалению, не устраняется даже применением стандартных методов регуляризации [5]. Более эффективным оказался двухэтапный подход: для грубого поиска решения используется метод формального поиска, а при достижении условия корректности задачи по Тихонову – метод градиентного спуска.

Результаты реконструкции профиля скорости звука показывают, что методы фазовой и импульсной томографии обеспечивают практически одинаковую точность решения задачи, причем несколько более высокую, чем метод согласованного поля. В данной работе в качестве основного метода реконструкции характеристик бентического фронта был выбран метод фазовой томографии. Расчеты, проведенные применительно к задаче восстановления профиля скорости звука $c(z)$ в БФ и в нижерасположенном слое ААДВ в Бразильской котловине Атлантического океана, показали, что хорошее качество реконструкции и достаточно высокая скорость решения задачи достигаются при аппроксимации гидрологии БФ и ААДВ полиномами 4-го порядка (применение пробных функций вида $\mathrm{th}(\alpha z)$ менее эффективно). Оптимальным диапазоном частот для решения задачи является интервал 10–20 Гц. Результаты реконструкции профиля скорости звука в бентической фронтальной зоне методом фазовой томографии (рабочая частота 10 Гц) представлены на рис. 4, где реконструированный профиль скорости звука в пределах точности построения графиков совпадает с реальным.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Мировой океан" и поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-4449.2006.2.

Автор выражает благодарность А.С. Карепанову и С.Н. Сураеву за помощь в выполнении расчетов и Райнеру Шлитцеру (Германия) за предоставление данных эксперимента WOCE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chung Y.* Areal extent of the benthic front and variation of the scale height in Pacific deep and bottom water // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 30. P. 4169–4178.
2. *Соков А.В.* Бентический фронт в Тихом океане // Исследование океанографических процессов в тропической зоне Тихого океана. М.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 162–167.
3. *Кравчун П.Н.* Оценка влияния бентического фронта на распространение акустических волн в океане // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 5. С. 670–672.
4. *Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Акустическая томография океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997. 256 с.
5. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.

Influence of the Benthic Front on the Mode Structure of Acoustic Field in the Ocean

P. N. Kravchun

Faculty of Physics, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119899 Russia
e-mail: gedackt@mail.ru

Abstract—The characteristic features of the mode structure of low-frequency sound field in the ocean are investigated for the ocean regions containing the benthic front, which represents the boundary between the Antarctic bottom water and the deep water. The hydrographic characteristics of the benthic front are described with the use of the data of the international WOCE experiment. On the basis of mathematical simulation, the changes introduced by the benthic front into the phase and group velocities and the vertical structure of modes are estimated for a frequency range of 5–20 Hz. Possible ways of reconstructing the hydrographic characteristics of the benthic front by the mode tomography methods are considered.