

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ “RAY” ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ НА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ШЕЛЬФ И ГЛУБОКОЕ МОРЕ

© 2023 г. А. В. Буренин^{а, *}, М. С. Лебедев^а, В. В. Разживин^а,
С. С. Шкрамада^{а, **}, Ю. Н. Моргунов^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: shurick_burenin1@mail.ru

**e-mail: shkramada.ss@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Обсуждаются результаты исследований особенностей формирования импульсных характеристик на оси подводного звукового канала в волноводах с различными гидрологическими и батиметрическими условиями Японского и Охотского морей. Приведены результаты модельных расчетов и экспериментов, характеризующих закономерности распространения низкочастотных импульсных сигналов в сложных волноводах, включающих шельф и глубокое море на сотни километров. Показано, что одним из основных эффектов, определяющих дальнейшее распространение звука в сложных волноводах, включающих шельф и глубокое море, является эффект акустического “оползня”. Показано также, что численное моделирование процесса распространения сигналов из шельфа в глубокое море на акустических трассах в Японском и Охотском морях с использованием программы “RAY” обеспечивает хорошую сходимость рассчитанных и полученных экспериментально импульсных характеристик.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, импульсная характеристика, эффект акустического “оползня”, подводный звуковой канал, батиметрические и гидрологические условия

DOI: 10.31857/S0320791922600421, EDN: NDYIAR

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением технической реализации задач изучения и освоения Мирового океана является разработка и создание подводных робототехнических комплексов широкого применения. При этом требуется решать вопросы управления, связи и позиционирования для десятков и сотен подводных объектов, выполняющих задачи в заданных районах без всплытия на поверхность, с центром анализа и принятия решений на расстояниях в сотни километров.

Для решения этих задач были проанализированы работы, связанные с особенностями распространения широкополосных импульсных сигналов в подводном звуковом канале (ПЗК). В статье Р.А. Вадова приведен обзор работ, посвященных исследованиям закономерностей формирования акустических полей в ПЗК различных морей и океанов на протяженных трассах с использованием взрывных источников [1]. Анали-

зировались амплитудно-временные характеристики импульсных откликов для различных гидрологических условий и частотных диапазонов для решения практических задач, связанных с учетом потерь на распространение и затухания звука. С теми же целями в 1989 г. специалистами ТОИ ДВО РАН был проведен эксперимент в Тихом океане на трассе протяженностью 3972 км с использованием тональных источников с частотами 111, 232 и 315 Гц и были получены схожие выражения для расчета затухания звука [2]. Результаты приведенных работ успешно применялись при решении задач акустической дальнометрии для расчетов необходимых мощностей излучателей с учетом потерь на распространение на заданных трассах. Но, к сожалению, техническое и методическое обеспечение исследований в этих работах не позволяло обеспечить высокие точности измерения времен распространения, необходимые для решения задач акустической дальнометрии и навигации.

С начала 2000-х гг. в ТОИ ДВО РАН проводятся поисковые работы по акустической дальнометрии, являющейся основой подводной навигации, на больших расстояниях в сложных волноводах [3, 4]. Одним из основных эффектов, определяющих дальнейшее распространение звука в сложных волноводах, включающих шельф и глубокое море, является эффект акустического “оползня” [5]. Этот эффект заключается в фокусировке акустической энергии в придонном слое на шельфе, переходе ее на ось ПЗК в глубоком море и распространении по траекториям, близким к прямолинейным, и с минимальным затуханием на большие расстояния. Использование этого эффекта при работе гидроакустических навигационных систем может обеспечить увеличение точности измерения расстояний на прямолинейных траекториях путем умножения скорости звука на оси ПЗК на время распространения сигнала от источника до приемника. Важным элементом достижения высоких точностей измерения расстояний является применение фазоманипулированных сигналов типа М-последовательностей, которые имеют хорошие корреляционные свойства. Для экспериментов, описываемых в статье, при свертке принятых сигналов с излученными и обеспечении временной синхронизации точность измерения времени составила 0.001 с.

Задача обеспечения условий реализации эффекта “оползня” при приеме навигационных сигналов связана с необходимостью учета угла наклона в шельфовой зоне и расстояния от излучателя до свала глубин. Поэтому оптимальным решением является предварительное проведение численного моделирования процесса распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море, с поиском технических, гидрологических и батиметрических условий для реализации эффекта “оползня”. Для этого была выбрана имеющаяся в ТОИ ДВО РАН вычислительная программа “RAY”, базирующаяся на лучевых представлениях распространения акустической энергии [6].

В обсуждаемой статье представлены результаты экспериментальных и численных исследований амплитудно-временных характеристик импульсных откликов в двух различных волноводах, типичных для морей северо-западной части Тихого океана. Проведено сравнение экспериментальных и модельных результатов “затягивания” во времени принятых на оси ПЗК сигналов для определения соответствия модели на основе программы “RAY” реальным процессам формирования и взаимодействия гидрологических и гидроакустических полей в рассмотренных волноводах. Показано практическое значение предварительных расчетов импульсных откликов волноводов в акваториях предполагаемых миссий подводных объектов, для выбора и обоснования характеристик и

приборного обеспечения районов навигационного обеспечения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на протяженных акустических трассах в Охотском море (250 км) и в Японском море (300 км) в разное время, но по одинаковой методике. Гидрологические и батиметрические условия проведения экспериментов представлены на рис. 1 и 3. Можно отметить существенные отличия вертикальных разрезов скорости звука (ВРСЗ) из-за влияния холодного промежуточного слоя в приповерхностных водах Охотского моря.

Широкополосный пьезокерамический излучатель располагался на глубине 34 м, вблизи береговой линии, в 1 м от дна. Для зондирования использовались фазоманипулированные М-последовательности сигналы (длина последовательности 1023 символа, несущая частота 400 Гц, на один символ последовательности приходится 4 периода несущей частоты). Излучение сигналов проводилось каждые 5 мин в течение нескольких часов.

В глубоководной части моря сигналы регистрировались на дрейфующий вблизи судна модернизированный радиогидроакустический буй, состоящий из гидрофона, системы GPS и системы единого времени. Гидрофон заглублялся до оси ПЗК, местоположение которой определялось при измерении ВРСЗ гидрологическим зондом с судна.

Методика обработки полученной информации основывалась на вычислении взаимно-корреляционной функции между излученным и принятым сигналом. Далее, рассчитывается огибающая взаимно-корреляционной функции, которая является оценкой импульсной характеристики волновода (ИХВ) с разрешением по времени, соответствующим параметрам зондирующего сигнала.

На рис. 2 приведены фрагменты ИХВ в линейном масштабе, измеренные в Охотском и Японском море с использованием описанной выше методики. Пунктирными вертикальными линиями обозначены границы времени “затягивания” принятого сигнала: $\tau_0 = \sim 1-1.2$ с; $\tau_{\text{я}} = 0.4$ с (здесь и далее значками “Я” и “О” обозначены величины, относящиеся к Японскому и Охотскому морям соответственно). При анализе результатов в статье вводится понятие “затягивание” сигнала, которое является одним из критериев, влияющих на эффективность работы приемных систем подводных объектов. Оно определяется как время задержки принятого сигнала относительно сигнала, прошедшего по кратчайшей прямолинейной траектории. В нашем случае это распространение вблизи оси ПЗК с минимальной скоростью и

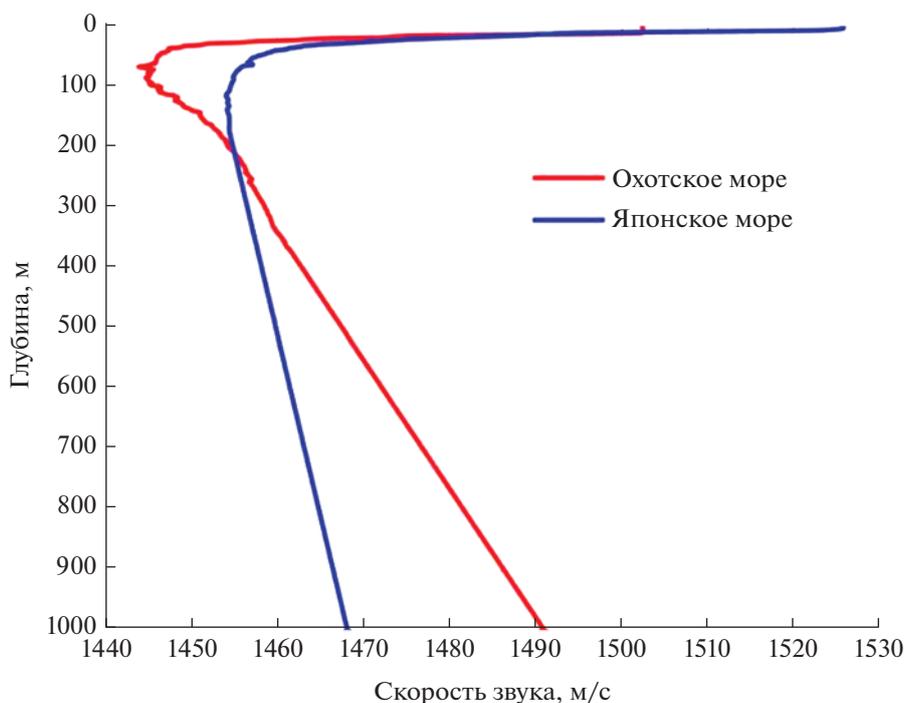


Рис. 1. Вертикальные разрезы скорости звука.

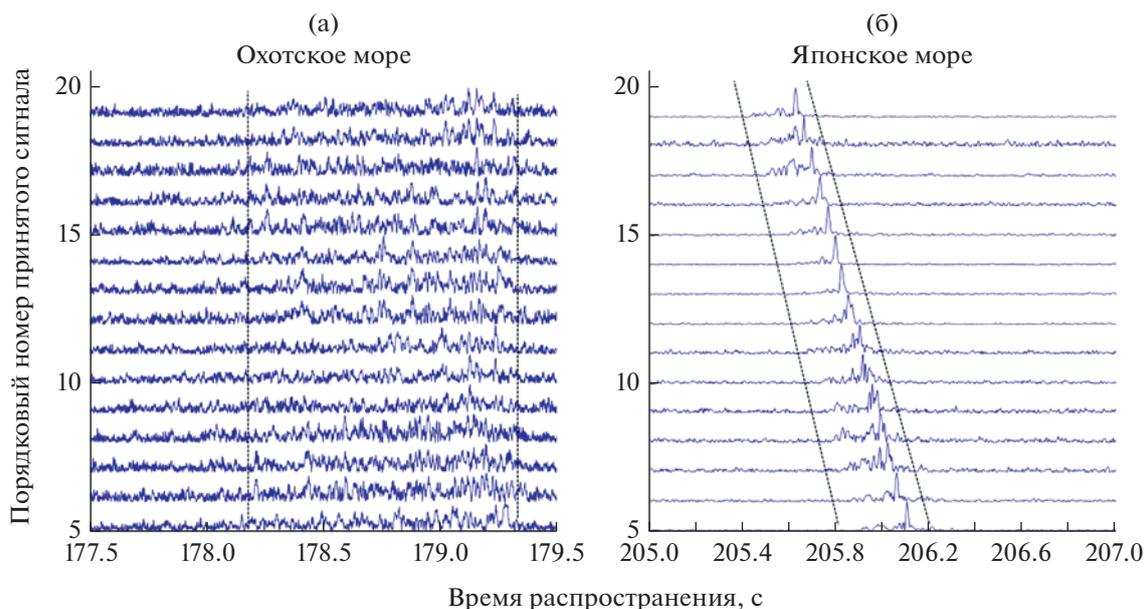


Рис. 2. Зависимость от времени импульсных характеристик волноводов: (а) – Охотского моря и (б) – Японского моря.

максимальным временем. Эксперимент показал, что амплитудно-временная структура ИХВ Охотского моря характеризуется большим практически в ~ 3 раза временем “затягивания” сигнала, чем ИХВ Японского моря. Максимальные пики ИХВ в Охотском море лежат во временном интервале от 0.4 до 0.6 с, тогда как в Японском море они

сосредоточены в конце ИХВ в интервале, не превышающем 0.05 с.

Следует отметить существенные отличия импульсных откликов в Японском и Охотском морях. Меньшая ширина ПЗК в Охотском море обуславливает рассредоточение акустической энергии во времени и, соответственно, снижает фокусирующую

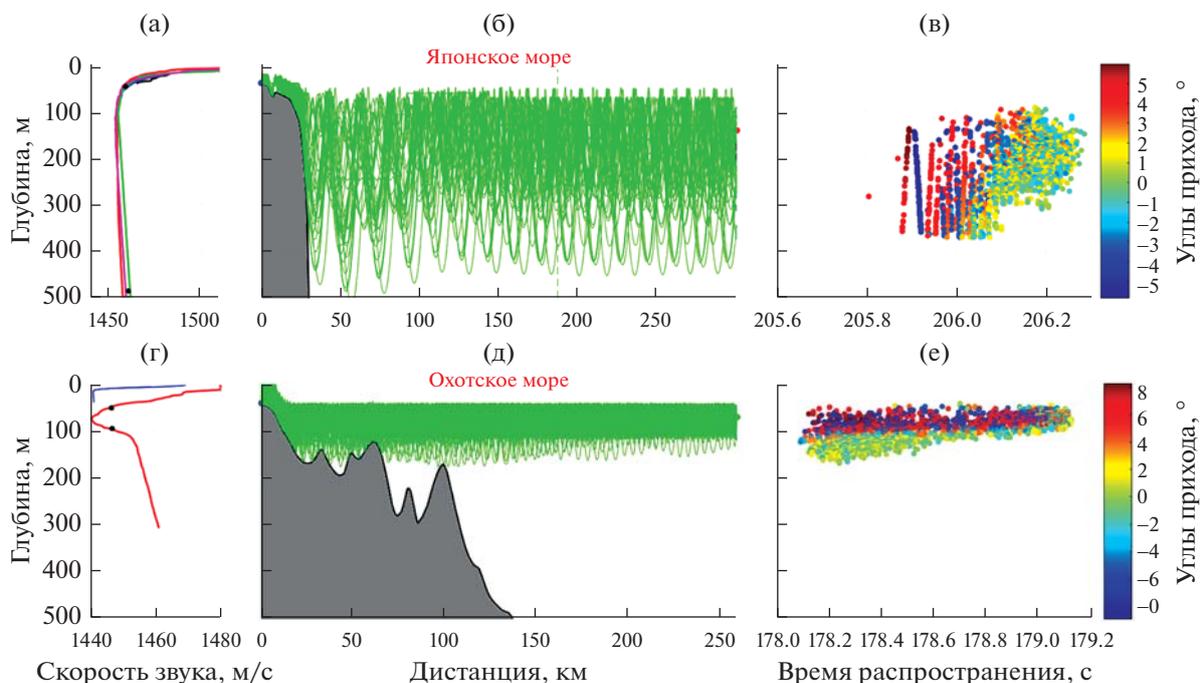


Рис. 3. Результаты численного моделирования: (а) – ВРСЗ_я и (г) – ВРСЗ_о; (б) и (д) – лучевые картины; (в) и (е) – трехмерные t – z – α диаграммы в координатах время распространения–горизонт приема–угол скольжения луча на приемнике.

ший эффект распространения в ПЗК. К тому же, близость оси ПЗК к поверхности вызывает повышенный уровень помех от обеспечивающего судна на приемном гидрофоне и снижение отношения сигнал/шум. По этой причине наблюдаются значительные вариации ИХВ на начальном участке из-за преимущественного влияния лучевых приходов с крутыми углами. Но в конце ИХВ фиксируются более стабильные лучевые приходы с близкими к нулевым углам скольжения относительно оси ПЗК и близкие по фазе, которые могут быть использованы для решения задач высокоточной дальнометрии.

Численное моделирование процессов формирования импульсных характеристик осуществлялось для гидрологических и батиметрических условий, при которых проводились экспериментальные работы (рис. 3). Для шельфовых участков акустических трасс были заданы следующие размеры: $R_o = \sim 115$ км, $R_y = \sim 27$ км. Углы наклона шельфа практически одинаковы и равны 1–1.2 градуса. ВРСЗ для обоих морей приведены на рис. 3а и 3г. Отметим следующие характеристики ВРСЗ: глубина оси ПЗК $Z_o = 50$ –80 м и $Z_y = 100$ –200 м, скорость звука на оси ПЗК $C_o = 1440.94$ м/с, $C_y = 1457.12$ м/с.

“Ширина” ПЗК (ΔH) определялась как вертикальное расстояние между горизонтами разворота луча выше z^+ и ниже z^- оси ПЗК, вышедшего из излучателя, расположенного на оси ПЗК, под уг-

лами $\alpha = \pm 5^\circ$, т.е. $\Delta H = z^- - z^+$. Значение углов выхода в 5 градусов было выбрано из практических соображений для учета основной энергии, канализирующей вблизи оси ПЗК. Значение глубин поворота лучей z^+ и z^- находим с использованием закона Снеллиуса и значений скорости звука на оси ПЗК. $C_{\text{поворот}} = C_{\text{ПЗК}}/\cos(\alpha)$. Значения скоростей звука на горизонтах поворота лучей $C_{\text{поворот}}(z^+)$ и $C_{\text{поворот}}(z^-)$ равны. Для Японского моря $C_{\text{поворот, я}} = C_y/\cos(5^\circ) = 1462.69$ м/с, для Охотского моря $C_{\text{поворот, о}} = 1446.44$ м/с. На рис. 3а и 3г значения z^+ и z^- отмечены черными точками. Следовательно, $\Delta H_o \approx 50$ м и $\Delta H_y \approx 450$ м. Столь значительные отличия связаны с наличием холодного промежуточного слоя при формировании ВРСЗ в Охотском море.

На рис. 3 приведены результаты модельных расчетов ИХВ Японского и Охотского морей в зависимости от времени и глубины приема. В волноводе Охотского моря все лучи захвачены “узким” ПЗК и формируют импульсный отклик длительностью 1 с (в пространстве 1500 м) в водном слое около 100 м. При этом в 50-метровом слое вблизи оси ПЗК принимаются сигналы, сформированные лучами с крутыми углами, и лишь в конце ИХВ фиксируются лучевые приходы с углами скольжения, близкими к нулевым углам. В то же время на глубине от 50 до 100 м также фиксируются близкие к нулевым углам лучевые приходы, которые формируются на участках разворота

та лучей к поверхности. В Японском море основная энергия ИХВ фиксируется во временном промежутке 0.4 с (в пространстве 520 м) в водном слое около 250 м. Вблизи оси ПЗК принимаются вначале сигналы, сформированные крутыми лучами, а в конце ИХВ (как и в Охотском море) фиксируются лучевые приходы с углами скольжения, близкими к нулевым. Очень важно, что результаты экспериментов, приведенные ранее, показали практически те же значения времен “затягивания”: $\tau_0 = \sim 1-1.2$ с; $\tau_{\text{я}} = 0.4$ с. Это свидетельствует о правильности выбранной для расчетов вычислительной программы “RAY”, т.к. сходимость экспериментальных и численных значений столь сложных ИХВ характеризует достижение адекватности модельных расчетов реальным процессам формирования акустических полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенные результаты имеют важное практическое значение доказанной эффективности применения расчетов импульсных откликов волноводов в акваториях предполагаемых миссий подводных объектов, для выбора и обоснования характеристик и приборного обеспечения районов навигационного обеспечения. Хорошая сходимость модельных расчетов с экспериментами по величинам затягивания сигналов и временам максимального прихода акустической энергии в конце ИХВ показала правильность выбора предложенных для реализации дальномерных измерений мест установки излучателей (углы наклона шельфа и расстояние до свала глубин).

В нашем случае модельные исследования процессов позиционирования подводных объектов в Японском и Охотском морях показали, что выбранные схемы размещения излучающих и приемных элементов гидроакустических навигационных систем (координаты, глубины), заданные параметры излучаемых сигналов и методы приема и обработки сигнальной информации, обеспечили (с экспериментальным подтверждением) решение поставленной задачи – реализацию эффекта “оползнь” для оптимального приема сигналов в заданных волноводах. Расчеты для обеих морей показали, что для получения высоких точностей измеренных времен распространения сигналов, а следовательно, и точности позиционирования подводных объектов, необходимо фиксировать поздние приходы акустической энергии, которые соответствуют лучам, распространяющимся по траекториям, близким к прямолинейным. При этом, чем короче по времени ИХВ, тем более четко выделяется последний приход акустической энергии с максимальной амплитудой и обеспечивается высокая точность расчета времени прохождения навигационного сигнала. Необходимо учитывать, что в “затянутой” по времени

ИХВ акустическая энергия рассредоточена по времени, и для получения достаточного превышения сигнала над помехой потребуется больший уровень излучения ИНС. Кроме этого, большое время “затягивания” ИХВ при передаче информационных посылок может привести к интерференции соседних битов. Устранить подобную проблему можно за счет увеличения времени передаваемого бита, что ведет, в свою очередь, к уменьшению скорости передачи. Таким образом, предварительные расчеты позволили качественно и количественно оценить необходимую пространственную и техническую оснащенность заданных акваторий для решения задач позиционирования и управления подводными объектами.

По результатам проделанной работы сформулированы основные выводы.

Показана эффективность применения вычислительной программы “RAY” для решения практических задач, связанных с восстановлением и физической интерпретацией процессов формирования импульсного отклика диагностируемых волноводов, включающих шельф и глубокое море.

Численное моделирование процессов распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море на протяженных акустических трассах с различными характеристиками подводных звуковых каналов показало хорошую сходимость результатов расчетов ИХВ с полученными экспериментально зависимостями амплитудно-временных характеристик импульсного отклика.

Работа выполнена по госбюджетной тематике ГОИ ДВО РАН: “Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем” (регистрационный номер: 0211-2021-0002); “Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования”, (шифр FWMM-2023-0003), направленных на обеспечение выполнения мероприятий Федеральной научной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадов Р.А.* Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 3. С. 313–328.
2. *Бондарь Л.Ф., Захаров В.А., Косырев Б.А., Моргунов Ю.Н.* Исследование особенностей распространения низкочастотного звука вдоль протяженной трассы в Тихом океане // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 2. С. 215–219.

3. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 374–380.
4. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 191–196.
5. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // J. Acoust. Soc. Amer. 2002. V. 111. № 2. P. 757–762.
6. Bowlin J.B., Spiesberger J.L., Duda T.F., Freitag L.E. Ocean acoustical RAY-tracing software “RAY”. Woods Hole Oceanographic Technical Report. WHOI-93-10, 1993.