

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОЕ МОРЕ В ЗИМНИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2017 г. Ю. Н. Моргунов, А. В. Буренин*, В. В. Безответных, А. А. Голов

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43*

**e-mail: alex_bu@poi.dvo.ru, shurick_burenin1@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.11.2016 г.

Обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 года на акустической трассе протяженностью 194 км при зимних гидрологических условиях. Исследован наиболее сложный случай распространения импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море при наличии на акустической трассе вихревого образования. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показал, что фиксируемый во всех точках максимальный первый приход акустической энергии хорошо согласуется с расчетом. Это свидетельствует о том, что на данном горизонте приема первыми приходят импульсы, прошедшие в приповерхностном звуковом канале по кратчайшему расстоянию и под малыми, близкими к нулю, углами. Предложена методика расчета средней скорости звука на трассе по данным спутникового мониторинга поверхностной температуры, позволяющая рассчитывать на успешное применение полученных результатов в задачах акустической дальнометрии и навигации.

Ключевые слова: гидроакустика, распространение звука, псевдослучайные сигналы, подводная навигация, дальнометрия, синоптические вихри.

DOI: 10.7868/S0320791917060119

Исследование особенностей распространения акустической энергии из шельфа в глубокое море имеет важное прикладное значение для решения задач акустической томографии неоднородностей морской среды, звукоподводной связи и навигации [1–4]. Особенно актуальны эти исследования для обоснования и разработки измерительных комплексов для обеспечения позиционирования и управления подводными роботами на расстояниях в сотни километров. Так как подобные комплексы должны функционировать круглогодично, возникла необходимость исследования особенностей распространения широкополосных импульсных сигналов в зимних гидрологических условиях, когда в морской среде формируется приповерхностный звуковой канал.

В статье обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 года на акустической трассе протяженностью 194 км, включающей мелководный шельфовый участок около 20 км с абсолютно отражающим дном (рис. 1б). Исследования проводились в течение пяти суток и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательности, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 500 Гц, излучаемых

источником, расположенным на шельфе, в пяти точках на удалении ~1, 26, 82, 139 и 194 км. Методика и техника эксперимента подробно описаны в работе [3]. Как и в [3], на судне выполнялись измерения вертикального профиля температуры (скорости звука) и регистрация зондирующего сигнала в каждой точке в течение двух часов. На рис. 2 приведены 20-минутные фрагменты импульсных характеристик, полученные в четырех точках трассы, после свертки принятого сигнала с маской излученного.

Можно отметить стабильную, с хорошим превышением над помехой, структуру импульсных приходов, формирующую сплошную зону освещенности во всех точках трассы в течение длительного времени измерений. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показывает, что во всех точках и почти во всех временных реализациях фиксируется максимальный по амплитуде первый приход. Это свидетельствует о том, что на данном горизонте первыми принимаются импульсы, прошедшие в приповерхностном слое по кратчайшему расстоянию и под малыми, близкими к нулю, углами [3]. Данный факт позволяет рассчитывать на хорошие точности расчетов расстояний между корре-

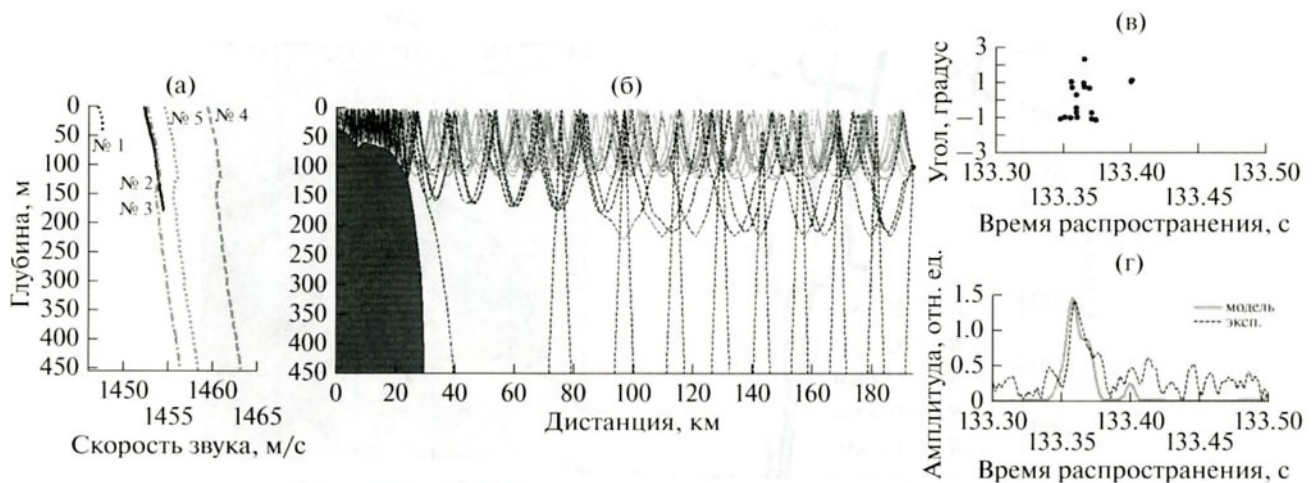


Рис. 1. Результаты численного моделирования: (а) модифицированные вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема; (б) рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы излучатель–точка № 5; (в) угловая структура поля в точке приема; (г) импульсная характеристика поля в точке приема.

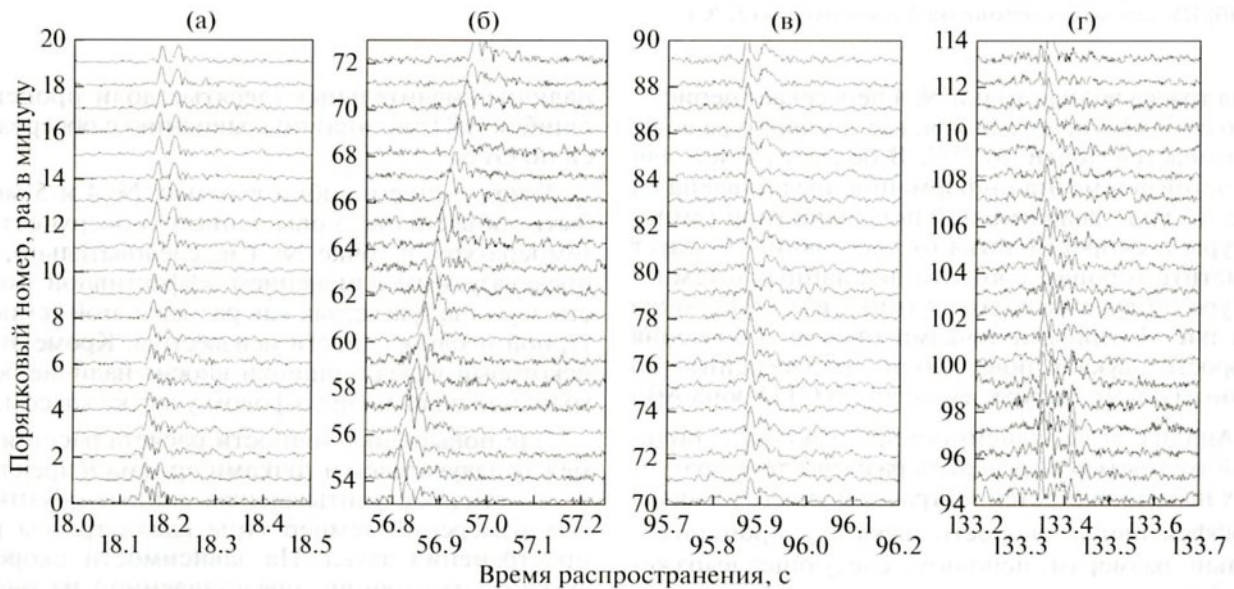


Рис. 2. Импульсные характеристики волновода в точках: (а) № 2 – 26 км; (б) № 3 – 82 км; (в) № 4 – 139 км; (г) № 5 – 194 км.

спондирующими точками при решении навигационных задач, так как нет необходимости учитывать искривление лучевых траекторий. Однако, если в приповерхностном слое по трассе распространения присутствует изменчивость температуры (скорости звука), то она должна быть определена техническими средствами и учтена при расчете эффективной (средней) скорости звука.

В период проведения эксперимента гидрологические условия на шельфовом участке трассы и в верхнем слое глубоководной части моря харак-

теризовались наличием положительного вертикального градиента скорости звука (рис. 3а), кроме точек 3 и 4, вблизи которых температура повышается почти до 3 градусов и фиксируется небольшой (0.023 c^{-1}) отрицательный градиент вертикальных распределений скорости звука (ВРСЗ). Для анализа гидрологической ситуации на диагностируемой акватории был привлечен инфракрасный (ИК) снимок поверхностной температуры моря, полученный со спутника NOAA-18 в Центре регионального спутникового мониторинга ДВО РАН (рис. 3б). Видно, что акустиче-

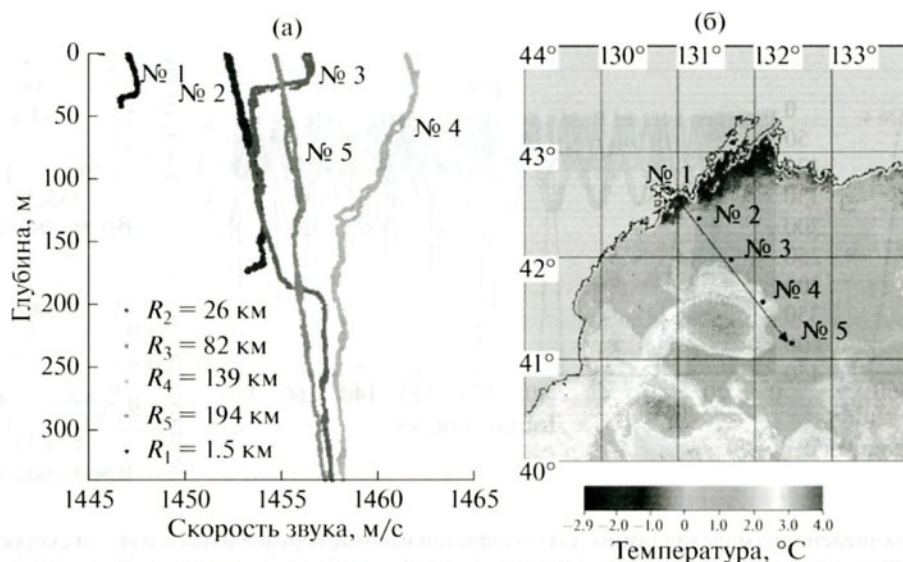


Рис. 3. Гидрологическая обстановка на акватории: (а) вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (расстояние от источника: № 1 – 1 км, № 2 – 26 км, № 3 – 82 км, № 4 – 139 км, № 5 – 194 км); (б) ИК-снимок поверхностной температуры (T , °C).

ская трасса вблизи точки № 4 пересекает периферию синоптического вихря, где температура воды повышается почти до 3°C. В более удобной для расчетов форме эта информация представлена на рис. 4 в виде зависимостей поверхностной температуры и скорости звука от расстояния. Следует отметить хорошее соответствие данных о температуре, полученных со спутника и с СТД-зонда (на рис. 4 черными точками отмечены значения скорости звука у поверхности, рассчитанные по данным о температуре, измеренной СТД-зондом).

Анализ этих зависимостей позволил с большой точностью определить размеры температурных неоднородностей на трассе и учесть их вклад в эффективную скорость звука $C_{эф}$ пропорционально размерам, используя следующее выражение [1]:

$$C_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i R_i}{D}, \quad \text{где } D = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

C_i – скорость звука на i -м участке трассы, R_i – длина i -го участка трассы с постоянной скоростью звука.

Все данные измеренных и рассчитанных величин, характеризующих результаты эксперимента, приведены в таблице. Вычисление расстояний между корреспондирующими точками R путем простейшего умножения измеренных времен распространения импульсов t на скорость звука C в приповерхностном слое, измеренную СТД-зондом в конечных точках приема (рис. 3а), показало

наличие значительных (десятые доли процента) ошибок ΔR (таблица) по сравнению с обсервацией по GPS.

Наибольшие ошибки в точках № 4 и 5 могут быть объяснены повышением поверхностной температуры в точке № 4 и, следовательно, непредсказуемым изменением эффективной скорости звука на трассе, так как размеры этой температурной неоднородности неизвестны. Кроме этого, некоторый вклад в ошибки вносит наличие более холодной воды на шельфовом участке трассы.

Для повышения точности расчета расстояний между излучателем и точками приема R предлагается методика, учитывающая данные спутниковых измерений температуры вдоль трассы распространения звука. На зависимости скорости звука от расстояния, представленной на рис. 4, выделяем следующие участки: 0–26 км со средней скоростью звука 1448 м/с; 26–115 км со средней скоростью 1452 м/с; 115–150 км со средней скоростью 1462 м/с; 150–194 км со средней скоростью 1455 м/с. Далее, используя выражение (1) для расчета эффективной скорости звука на соответствующих участках трассы, получаем скорректированные расстояния $R_{корр}$ (таблица) и ошибки $\Delta R_{корр}$ (таблица), которые снизились до сотых долей процента. Следует отметить, что данная методика может совершенствоваться при более сложных гидрологических условиях путем использования интегрирования зависимости скорости звука от расстояния, приведенной на рис. 4.

Проведение расчетов импульсных характеристик с использованием хорошо зарекомендовавшей себя в предыдущих работах [2, 3] программы

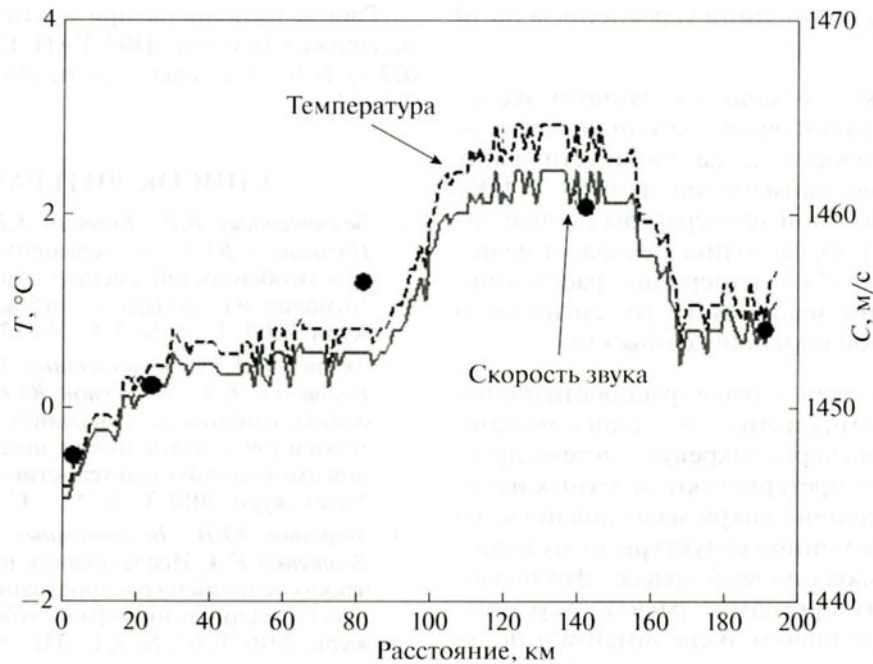


Рис. 4. Зависимость поверхностной температуры (T , °C) и скорости звука (C , м/с) от расстояния на акустической трассе по спутниковым данным. Точками обозначены средние значения скорости звука, измеренные гидрологическим зондом.

RAY [5] показало наличие значительной зоны тени на горизонте приема при включении в расчетный блок измеренных ВРСЗ в точках приема, что расходится с данными эксперимента. Это может объясняться тем, что данная программа была разработана для проведения расчетов более высокочастотных сигналов, и поэтому даже столь малый отрицательный градиент ВРСЗ в точках 3 и 4 (0.023 с^{-1}) обеспечил искривление лучевых траекторий в сторону дна. Для обеспечения качественных расчетов импульсных характеристик волноводов ВРСЗ были модифицированы из физических соображений. В точках № 3 и 4 отрицательный градиент скорости звука был заменен на положительный, но значения скорости звука в приповерхностном слое соответствовали

измеренным STD-зондом (рис. 1а). Это позволило обеспечить в расчетах сплошную зону освещенности в приповерхностном канале, зафиксированную в эксперименте. При этом была сохранена основная информация об изменчивости поля скорости звука на различных участках трассы при расчете расстояний между корреспондирующими точками. На рис. 1г приведен результат расчета импульсной характеристики волновода на расстоянии 194 км с учетом модифицированных ВРСЗ и зависимости изменения скорости звука на трассе от расстояния, приведенной на рис. 4. Анализ показывает, что результаты расчета качественно иллюстрируют характер лучевых траекторий в приповерхностном звуковом канале и коррелируют с экспериментальной импульсной

Таблица 1. Расчет расстояний между корреспондирующими точками

Точка	R_{GPS} , м	t , с	C , м/с	R , м	ΔR , м, %	$C_{эф}$, м/с	$R_{КОРР}$, м	$\Delta R_{КОРР}$, м, %
№ 2	26234	18.13	1451	26306	72.6 0.2%	1448	26252	18 0.06%
№ 3	82357	56.81	1452	82488	131.12 0.15%	1450.4	82397	40.2 0.04%
№ 4	139209	95.88	1462	140176	967.5 0.69%	1452.7	139285	75.8 0.054%
№ 5	193729	133.35	1455	194024	295 0.15%	1452.9	193744	15 0.007%

характеристикой, полученной усреднением по 10 реализациям.

Таким образом, в условиях натурального эксперимента была апробирована методика расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах на основе применения данных с ИК-снимков поверхностной температуры на диагностируемой акватории. Методика позволяет на порядок снизить ошибки измерения расстояний между источником навигационных сигналов и приемной системой подводного объекта.

Показано, что для случая распространения низкочастотных импульсных сигналов с малыми углами скольжения через вихревую систему лучевые траектории не претерпевают заметных изменений, так как наличие вихря мало повлияло на формирование временной структуры импульсного отклика волновода на всей трассе. Это позволило адаптировать программу расчета акустических полей [5] к условиям эксперимента и получить эффективный инструмент для прогнозных оценок амплитудно-временных и угловых характеристик полей, сформированных низкочастотными псевдослучайными сигналами.

Авторы выражают благодарность В.Б. Лобанову и С.Ю. Ладыченко за предоставленные космические снимки и их физическую интерпретацию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН 15-П-1-045, 15-П-1-012_о, ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (п/п 12, Тема 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
3. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 341–347.
4. Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.G., Akulich V.A., Morgunov Yu.N. Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: a pilot experiment // IEEE J. Oceanic Engineering. 2003. V. 28. № 2. P. 297–302.
5. 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.