

## Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря

А. В. Буренин,<sup>\*</sup> Ю. Н. Моргунов<sup>†</sup>

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН*

*Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43*

(Статья поступила 23.06.2017; Подписана в печать 26.06.2017)

В статье обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 г. 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.

PACS: 43.30.-k, 43.30.+m УДК: 534.222

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

### ВВЕДЕНИЕ

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 исследовать особенности распространения широкополосных импульсных сигналов в зимних гидрологических условиях, когда в морской среде формируется приповерхностный звуковой канал.

### 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В докладе обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 г. на акустической трассе протяженностью 194 км, включающей мелководный шельфовый участок около 20 км с абсолютно отражающим дном (рис. 1,б). Исследования проводились в течение пяти суток и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов ( $M$ –последовательности, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 500 Гц, излучаемых источником расположенном на шельфе, в пяти точках на удалении  $\sim 1, 26, 82, 139$  и 194 км. Методика и техника эксперимента подробно описана в работе [3]. Как и в [3], на судне выполня-

лись измерения вертикального профиля температуры (скорости звука) и регистрация зондирующего сигнала в каждой точке в течение 2 часов.

На рис. 2 приведены 20-ти 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, формирующих сплошную зону освещенности во всех точках трассы в течение длительного времени измерений. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показывает, что во всех точках 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 корреспондирующими точками при решении навигационных задач, т.к. нет необходимости учитывать искривление лучевых траекторий. Но, при наличии изменчивости температуры (скорости звука) в приповерхностном слое по трассе распространения, 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 характеризовались наличием положительного вертикального градиента скорости звука, кроме точек 3 и 4, вблизи которых температура повышается почти до 3°C и фиксируется небольшой ( $0,023 \text{ с}^{-1}$ ) отрицательный градиент вертикального распределения 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 спутни-

<sup>\*</sup>E-mail: alex\_bu@poi.dvo.ru

<sup>†</sup>E-mail: shurick\_burenin1@mail.ru

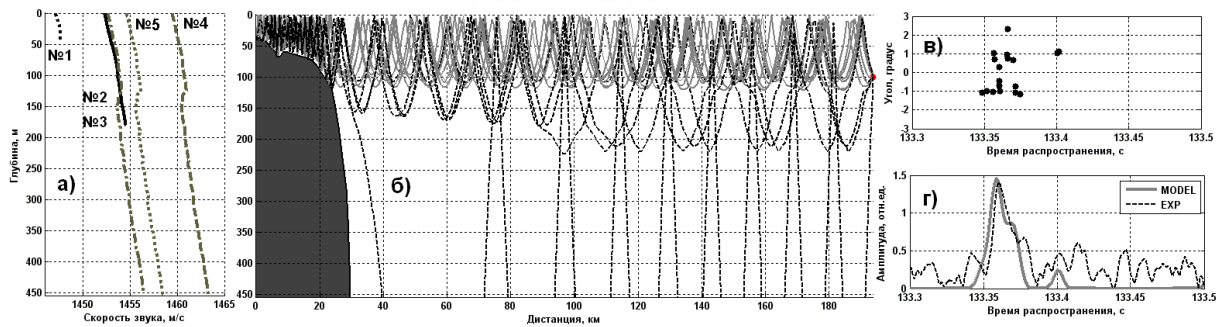


Рис. 1: Результаты численного моделирования: *a* — модифицированные вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема; *б* — рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы излучатель — точка №5; *в* — угловая структура поля в точке приема; *г* — импульсная характеристика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

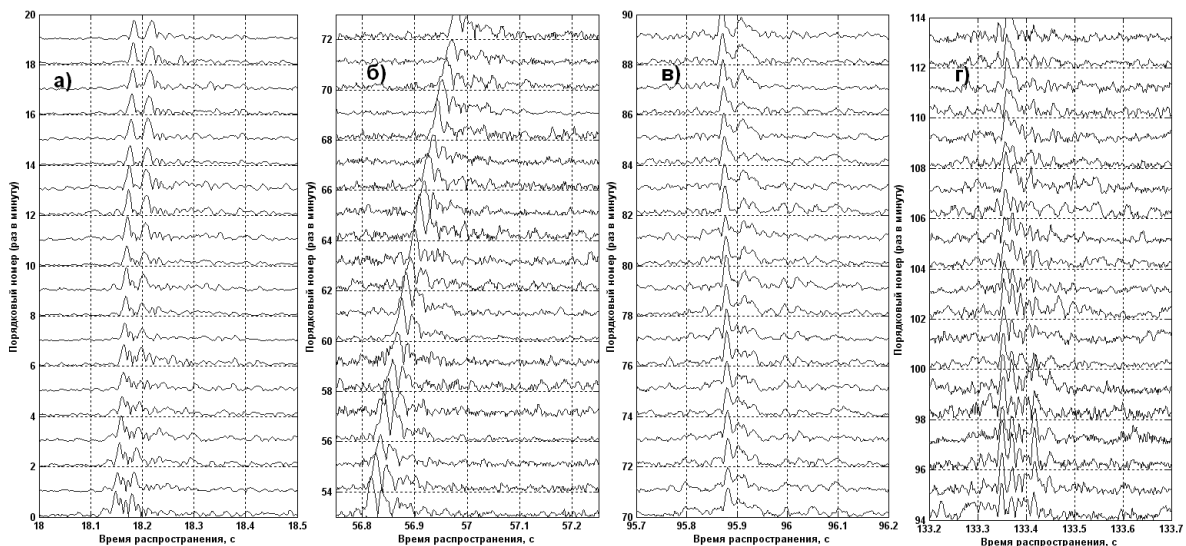


Рис. 2: Импульсные характеристики волновода в точках: *a* — №2, 26 км; *б* — №3, 82 км; *в* — №4, 139 км; *г* — №5, 194 км

кового мониторинга ДВО РАН (рис. 3,б). Видно, что акустическая 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 STD-зонда (на рис. 4 черными точками отмечены значения скорости звука у поверхности, рассчитанные по данным о температуре, измеренной STD-зондом).

Проведение расчетов импульсных характеристик с использованием хорошо зарекомендовавшей себя в предыдущих работах [2, 3] программы 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 ( $0,023 \text{ c}^{-1}$ ) 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. 1,а). 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 рисунке 1,г

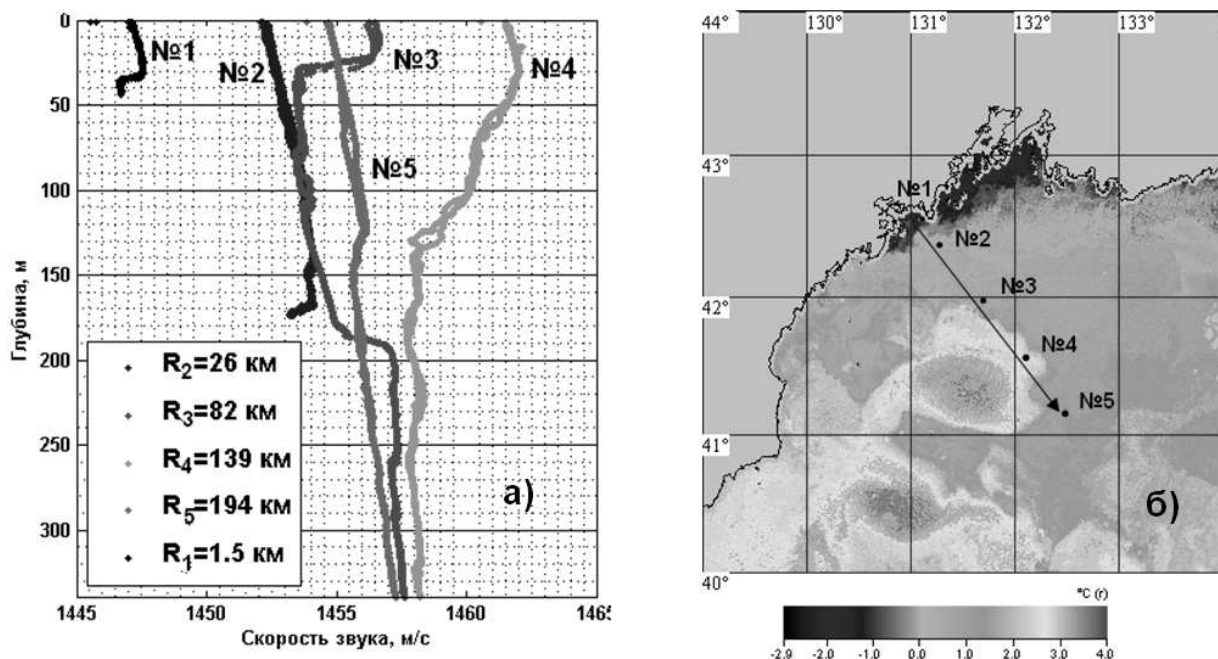


Рис. 3: Гидрологическая обстановка на акватории: а — вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (расстояние от источника : №1 — 1 км, №2 — 26 км, №3 — 82 км, №4 — 139 км, №5 — 194 км); б — ИК снимок поверхностной температуры

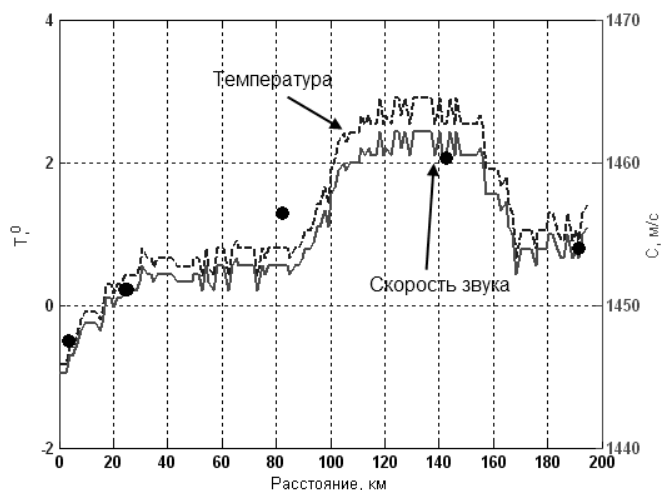


Рис. 4: Зависимость поверхностной температуры ( $T$  °C) и скорости звука ( $C$ , м/с) от расстояния на акустической трассе по спутниковым данным. Точками обозначенные средние значения скорости звука, измеренные гидрологическим зондом

приведен результат расчета импульсной характеристики волновода на расстоянии 194 км с учетом модифицированных ВРСЗ и зависимости изменения скорости звука на трассе от расстояния, приведённой на рис 4. Анализ показывает, что результаты расчета каче-

ственно иллюстрируют характер лучевых траекторий в приповерхностном звуковом канале и коррелируют с экспериментальной импульсной характеристикой, полученной усреднением по 10 реализациям.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что для случая распространения низкочастотных импульсных сигналов с малыми углами скольжения через вихревую систему лучевые траектории не претерпевают заметных изменений, т.к. влияние 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-II-1-045, 15-I-1-012о, ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (п/п 12, Тема 2).

- 
- [1] Безответных В. В., Буренин А. В., Моргунов Ю. Н., Половинка Ю. А. Акуст. журн. 2009. **55**, № 3. С. 374.  
[2] Акуличев В. А., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Моргунов Ю. Н. Акуст. журн. 2010. **56**, № 1. С. 51.  
[3] Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А. Акуст. журн. 2016. **62**, №3. С. 341.  
[4] Spindel R. C., Na J., Dahl P. H., Oh S., Eggen C., Kim Y. G., Akulichev V. A., Morgunov Y. N. IEEE J. of Oceanic Engineering. 2003. **28**, № 2. P. 297.  
[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.

---

## The propagation of pulsed pseudo-random signals from the shelf into the deep sea during the winter hydrological conditions of the Japan sea

A. V. Burenin<sup>a</sup>, Yu. N. Morgunov

*Pacific Oceanological Institute. V.I. Il'ichev FEB RAS*

*Vladivostok, 690041, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>alex\_bu@poi.dvo.ru*

The article discusses the results of an experiment conducted in the Japan sea in March 2016 on the acoustic track length of 194 km at the winter hydrological conditions. It was the most complicated case of propagation of pulsed pseudo-random signals from the shelf into the deep sea in the presence of acoustic track the vortex formation. Analysis of experimentally obtained impulse response showed that apparent at all points in the maximum first arrival of acoustic energy is in good agreement with the calculation. This suggests that the horizon of reception of the first pulses come, the past in the near-surface sound channel at the shortest distance and at small, close to zero angles.

PACS: 43.30.-k, 43.30.+m.

*Keywords:* hydrpacoustics, sound propagation, pseudo-random signals, synoptic vortices.

*Received 23 June 2017.*

### Сведения об авторах

1. Буренин Александр Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (423) 23-11-631, e-mail: alex\_bu@poi.dvo.ru.
  2. Моргунов Юрий Николаевич — доктор техн. наук, зав. лаб.; тел.: (423) 23-11-631, e-mail: morgunov@poi.dvo.ru.
-