

УДК 534.22

© E. A. Войтенко, Ю. Н. Моргунов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток  
evgeni@poi.dvo.ru

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ВИХРЕВУЮ СТРУКТУРУ  
В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ ЯПОНСКОГО МОРЯ**

Статья поступила в редакцию 24.03.2017, после доработки 27.04.2017.

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 во всех точках, на горизонте приема 70 м, фиксируется максимальный первый приход акустической энергии. На данном горизонте приема первыми приходят импульсы, прошедшие в приповерхностном звуковом канале по кратчайшему расстоянию и под малыми, близкими к нулю, углами. 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 известную программу расчета акустических полей RAY к условиям эксперимента. Предложена методика расчета средней скорости звука на трассе по данным спутникового мониторинга поверхностной температуры, позволяющая рассчитывать на успешное решение задач акустической дальномерии и навигации.

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

E. A. Voytenko, Yu. N. Morgunov

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia

**FEATURES OF LOW-FREQUENCY PULSE SIGNALS PROPAGATION  
THROUGH A VORTEX STRUCTURE IN THE JAPAN SEA IN WINTER CONDITIONS**

Received 24.03.2017, in final form 27.04.2017.

The results of the experiment done in the Japan Sea in March 2016 on the 194 kilometer long acoustic track are discussed. The most complicated case of the impulse wideband pseudo-random signals distribution from a shelf into a deep sea crossing the eddy is investigated. The analysis of the experimentally achieved impulse responses showed that the maximal first arrival detected in all measurements points has a good correlation with the calculations. The impulses propagated in the near-surface sound channel on a shortest range at angles close to zero are received first on the studied receiving horizon. For the case of the low frequency impulse signals distribution with small sliding angles through the eddy structure it is shown that ray trajectories do not take any significant changes, because the eddy influence have minor effect on the time structure of the impulse response formation on all the track. This fact allowed adapting widely known software for the acoustic field calculations RAY for the experiment conditions. The methodic of the average sound speed on a track calculation using data from satellite monitoring of the surface temperature is proposed. The methodic allows counting on successful application of the achieved results in the tasks of the acoustic rangefinding and navigation.

**Key words:** hydroacoustics, sound propagation, pseudorandom signals, underwater navigation, synoptical vortex.

Ссылка для цитирования: Войтенко Е. А., Моргунов Ю. Н. Особенности распространения низкочастотных импульсных сигналов через вихревую структуру в зимних условиях Японского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 63—68.

For citation: Voytenko E. A., Morgunov Yu. N. Features of low-frequency pulse signals propagation through a vortex structure in the Japan Sea in winter conditions. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 2, 63—68.

DOI: 10.7868/S2073667317020083.

Перспективы развития навигационных систем для обеспечения позиционирования автономных подводных аппаратов (АПА) на больших удалениях от центров управления связаны с решением задач подводной дальномерии в сложных гидрологических и батиметрических условиях распространения сигналов. Исследование особенностей распространения акустической энергии из шельфа в глубокое море имеет важное прикладное значение для решения этих задач. В работах [1—4] экспериментально показано, что использование свойств подводного звукового канала (ПЗК) в летне-осенних и весенних гидрологических условиях Японского моря позволяет эффективно решать задачи акустической томографии неоднородностей морской среды, звукоподводной связи и навигации. Актуальными становятся подобные исследования для обоснования и разработки измерительных комплексов, обеспечивающих позиционирование и управление подводными роботами на расстояниях в сотни километров в гидролого-акустических условиях, при которых формируется приповерхностный звуковой канал (ППЗК).

В статье 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).

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, и измерении вертикального профиля температуры (скорости звука), в пяти точках на удалении ~1.5, 26, 82, 139 и 194 км. При проведении эксперимента применялась следующая методика. В 150 м от береговой черты на глубине 34 м был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель и соединен кабелем с береговым постом управления. Один раз в минуту излучались сложные фазоманипулированные сигналы. Длительность сеансов излучения варьировалась от 20 до 120 мин. Для приема сигналов использовался радиогидроакустический буй, внутри которого размещались радиопередатчик, модуль GPS, система единого времени для синхронизации излучающей и приемной систем, усилитель акустических сигналов, источник питания. Надводная часть буя была соединена при помощи кабеля с подводным гидрофоном, заглушенным примерно на 70 м. В центр анализа данных, расположенный на судне, по радиоканалу осуществлялась непрерывная передача поступающей с гидрофона первичной аналоговой акустической информации и каждую секунду данных с GPS о местоположении дрейфующего буя. Далее производилось вычисление функций взаимной корреляции принятых сигналов, с масками излученных, для получения импульсных характеристик канала распространения.

На рис. 2 приведены двадцатиминутные фрагменты импульсных характеристик, полученные в четырех точках трассы, после свертки принятого сигнала с маской излученного.

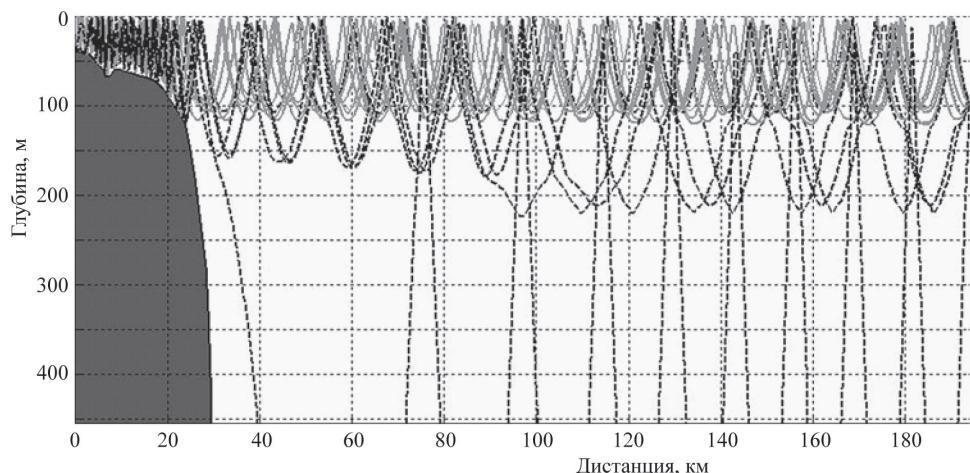


Рис. 1. Рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы излучатель — точка № 5.

Fig. 1. Bottom relief and example of a ray pattern for acoustic path: source — point No. 5.

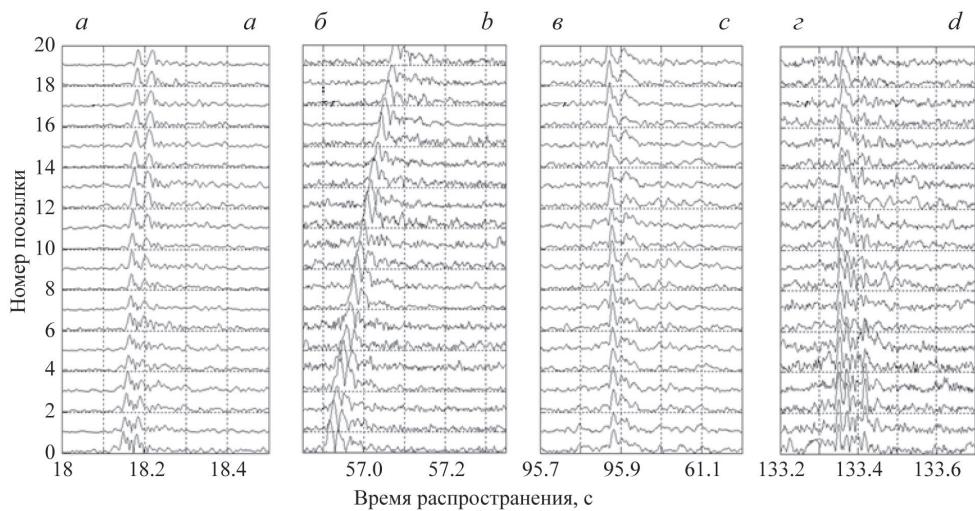


Рис. 2. Импульсные характеристики волновода в точках: *а* — № 2 — 26 км; *б* — № 3 — 82 км; *в* — № 4 — 139 км; *г* — № 5 — 194 км.

Fig. 2. Pulse characteristics of the waveguide at points: *a* — No. 2 — 26 km; *b* — No. 3 — 82 km; *c* — No. 4 — 139 km; *d* — No. 5 — 194 km.

Можно отметить стабильную, с хорошим превышением над помехой, временную структуру импульсных откликов волновода во всех точках трассы в течение длительного времени измерений. При этом заметно, что в точке № 3 приемная система дрейфовала в направлении от излучателя с большей скоростью, чем в остальных точках. 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 достижение высокой точности оценки расстояний между корреспондирующими точками при решении навигационных задач, т. к. отсутствует необходимость учета искривления 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  $3^{\circ}$  и фиксируется небольшой ( $0.023 \text{ с}^{-1}$ ) отрицательный градиент 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. 3, б, см. вклейку). Из анализа снимка видно, что акустическая трасса вблизи точек № 3 и 4 пересекает периферию синоптического вихря, где температура воды повышается почти до  $3^{\circ}\text{C}$ . В более удобной для расчетов форме информация о поверхностной температуре 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 гидрологического СТД-зонда (на рис. 4 чёрными точками отмечены значения скорости звука у поверхности, рассчитанные по данным о температуре, измеренной СТД-зондом). Антициклонические вихри синоптического масштаба регулярно наблюдаются в северо-западной части Японского моря. Они формируются в заливе Петра Великого, либо у побережья Кореи в осенний период, и в конце зимы движутся в восточном направлении, перенося в своих ядрах более теплые воды. В данном эксперименте часть акустической трассы в районе точек № 3 и 4 пересекает участок акватории с повышенной температурой на северной периферии вихря. В случае их расположения на 30—50 км юго-западнее и попадания в центральную часть вихря аномалия в вертикальном профиле температуры воды и, соответственно, скорости звука была бы значительно большей. Такие вихри существуют на протяжении

нескольких месяцев, движутся сравнительно медленно (3—6 см/с) и имеют характерную структуру вертикального распределения скорости звука.

Проведение расчётов 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 вертикальных распределений скорости звука (ВРСЗ) в точках приема, что расходится с данными эксперимента. Это может быть обусловлено тем, что данная программа была разработана для проведения расчётов более высокочастотных сигналов и поэтому даже столь малый отрицательный градиент ВРСЗ в точках 3 и 4 ( $0.023 \text{ с}^{-1}$ ) обеспечил искривление лучевых траекторий в сторону дна. Для проведения 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 СТД-зондом (рис. 3, 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 рис. 1 приведены результаты расчета лучевой структуры поля на трассе с учетом модифицированных ВРСЗ и зависимости изменения скорости звука на трассе от расстояния, приведённой на рис. 4. Анализ показывает, что результаты расчета качественно иллюстрируют характер лучевых траекторий в приповерхностном звуковом канале.

Использование данных, приведенных на рис. 4, позволило с большой точностью определить размеры температурных неоднородностей на трассе и учсть их вклад в эффективную скорость звука пропорционально размерам, используя следующее выражение:

$$C_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot R_i}{D}, \quad (1)$$

где  $D = \sum_{i=1}^n R_i$ ;  $C_i$  — скорость звука на  $i$ -ом участке трассы;  $R_i$  — длина  $i$ -го участка трассы с постоянной скоростью.

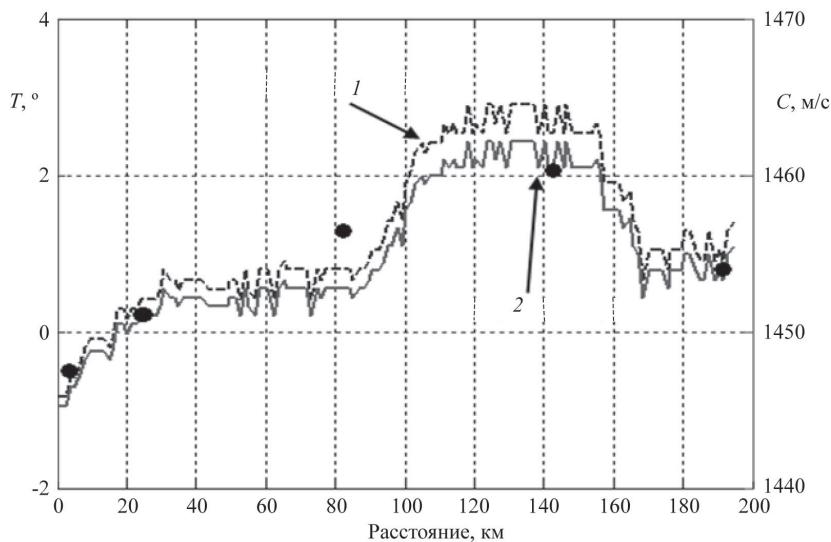


Рис. 4. Зависимость поверхности температуры (1) и скорости звука (2) от расстояния на акустической трассе по спутниковым данным.

Точки — значения скорости звука у поверхности, рассчитанные по данным о температуре, измеренной СТД-зондом.

Fig. 4. Dependence of the surface temperature (1) and the sound speed (2) on distance at the acoustic path according to satellite data.

Points — the values of sound speed at a surface calculated by data about temperature taken by the STD-probe.

Все данные измеренных и рассчитанных величин, характеризующих результаты эксперимента, приведены в таблице. Вычисление расстояний между корреспондирующими точками  $R_1$  путем умножения измеренных времен распространения импульсов  $t$  на скорость звука  $C$  в приповерхностном слое, измеренную СТД-зондом в точках приема (рис. 3, *a*), показало наличие значительных (десятие доли процента) ошибок  $\Delta R_1$  по сравнению с обсервацией по GPS (столбец 6 в таблице).

Наибольшие ошибки в точках 4 и 5 могут быть обусловлены повышением поверхностной температуры в точке 4 и, следовательно, непредсказуемом изменении эффективной скорости звука на трассе, т. к. размеры этой температурной неоднородности неизвестны. Кроме этого, некоторый вклад в ошибки вносит наличие более холодной воды на шельфовом участке трассы. Для повышения точности расчёта расстояний между излучателем и точками приёма  $R$  предлагается методика, учитывающая данные спутниковых измерений. 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  $R_2$  и ошибки  $\Delta R_2$ , которые снизились до сотых долей процента (столбцы 8 и 9). Следует отметить, что данная методика может совершенствоваться при более сложных гидрологических условиях путем использования интегрирования зависимости скорости звука от расстояния, приведенной на рис. 4.

\*\*\*

Таким образом, в условиях натурного 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. Для этого должна быть обеспечена передача необходимой информации по гидроакустическому каналу с берегового поста.

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 содействии Тихоокеанского флота ВМФ РФ и Дальневосточного отделения Секции прикладных проблем при Президиуме РАН в организации и проведении экспериментальных работ и частичной финансовой поддержке: проектов № 15-І-1-012 о, № 15-ІІ-1-046 ПФИ ДВО РАН «Дальний Восток» на 2015-2017 гг.; ПФИ гос. акад. наук на 2013-2020 гг. (н/н 12, Тема 1).*

#### Расчет расстояний между корреспондирующими точками

№ точки	RGPS, м	$t$ , с	$C$ , м/с	$R_1$ , м	$\Delta R_1$ , м, %	$C_{\text{ЭФФ}}$ , м/с	$R_2$ , м	$\Delta R_2$ , м, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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

### Литература

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 формирования 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. Акуличев В. А., Моргунов Ю. Н., Бородин А. Е. Региональная система подводного навигационного обеспечения и дистанционного управления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 2. С. 36—40.
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.

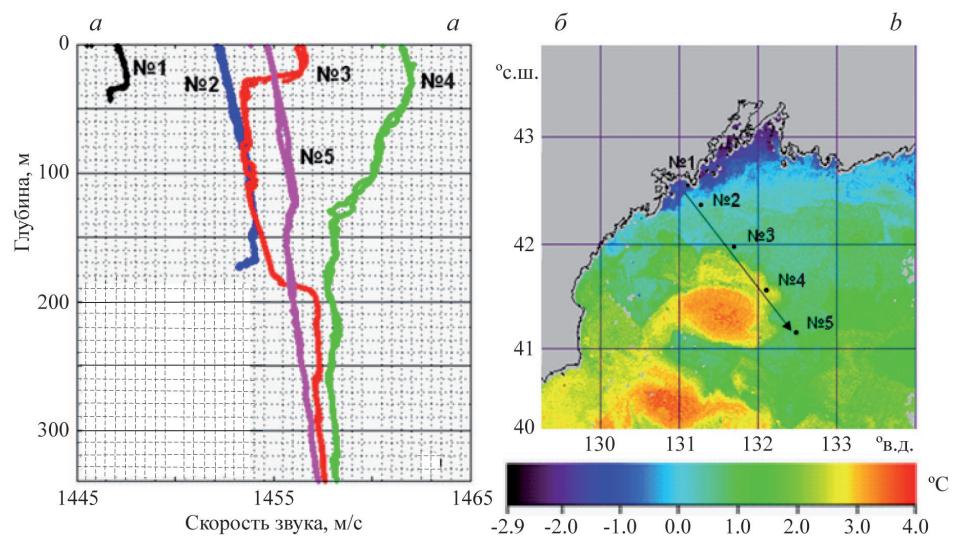


Рис. 3. Гидрологическая обстановка на акватории: *а* — вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя  $R_1$  и в точках приема  $R_2$ — $R_5$  (расстояние от источника: № 1 — 1.5 км; № 2 — 26 км; № 3 — 82 км; № 4 — 139 км; № 5 — 194 км); *б* — ИК-снимок поверхности температуры.

Fig. 3. Hydrological conditions of the water area: *a* — vertical sound speed profiles near the source  $R_1$  and at the reception points  $R_2$ — $R_5$  (distances from the source: No. 1 — 1.5 km; No. 2 — 26 km; No. 3 — 82 km; No. 4 — 139 km; No. 5 — 194 km); *b* — IR-image of the surface temperature.