

УДК 534.222

## ОСОБЕННОСТИ ГЛУБОКОВОДНОГО ПРИЁМА ИМПУЛЬСНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ИЗ ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОЕ МОРЕ

Академик РАН В. А. Акуличев<sup>1</sup>, Ю. Н. Моргунов<sup>1</sup>,  
А. А. Голов<sup>1,\*</sup>, С. И. Каменев<sup>1</sup>, П. С. Петров<sup>1,2</sup>

Поступило 26.02.2019 г.

Обсуждаются результаты эксперимента, проведённого в сентябре 2017 г., для обоснования применимости эффекта “акустического оползня” при решении задач позиционирования автономных подводных аппаратов в случае их функционирования на глубинах, существенно превышающих глубину оси подводного звукового канала. Приводятся результаты экспериментальных исследований и численного анализа эффекта фокусировки акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе её в глубоководные (до 500 м) слои Японского моря для летне-осенних гидрологических условий. Выполнено математическое моделирование распространения акустических волн в модельном волноводе, воспроизводящем условия эксперимента, с применением метода параболического уравнения. Наблюдаемые эффективные скорости распространения сигналов объяснены с использованием метода нормальных волн.

*Ключевые слова:* подводный звуковой канал, групповые скорости, эффективные скорости, глубоководный приём, сложные сигналы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873322-327>

Одним из перспективных направлений развития методов и технических средств акустической дальнометрии и навигации большого радиуса действия является использование особенностей распространения низкочастотных импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море. Это связано с возможностью применения эффекта акустического “оползня”, который заключается в фокусировке акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе её на ось подводного звукового канала (ПЗК) в глубоком море. В работах [1–5] экспериментально показано, что применение этого эффекта в летне-осенних и весенних гидрологических условиях Японского моря позволяет эффективно решать задачи акустической томографии неоднородностей морской среды, звукоподводной связи и навигации. На основе этих результатов была разработана уникальная технология для обеспечения позиционирования и управления автономными подводными аппаратами (АПА) на расстояниях в сотни километров [6]. Так как данная технология разработана и апробирована для обязательного нахождения АПА вблизи оси подводного звукового канала

(ПЗК), то в некоторых случаях это существенно ограничивает возможности эффективного выполнения миссий.

Целью данного исследования было проведение экспериментов и теоретических расчётов, направленных на обоснование применимости эффекта “акустического оползня” для решения задач позиционирования АПА при их функционировании на глубинах, существенно превышающих глубину оси ПЗК.

В работе обсуждаются результаты эксперимента, проведённого в Японском море в сентябре 2017 г. на акустической трассе длиной 198 км, включающей мелководный шельфовый участок протяжённостью около 25 км. Рисунок 1 иллюстрирует особенности рельефа дна от источника навигационных сигналов (ИНС), установленного вблизи берега на глубине 34 м, до глубоководной части трассы.

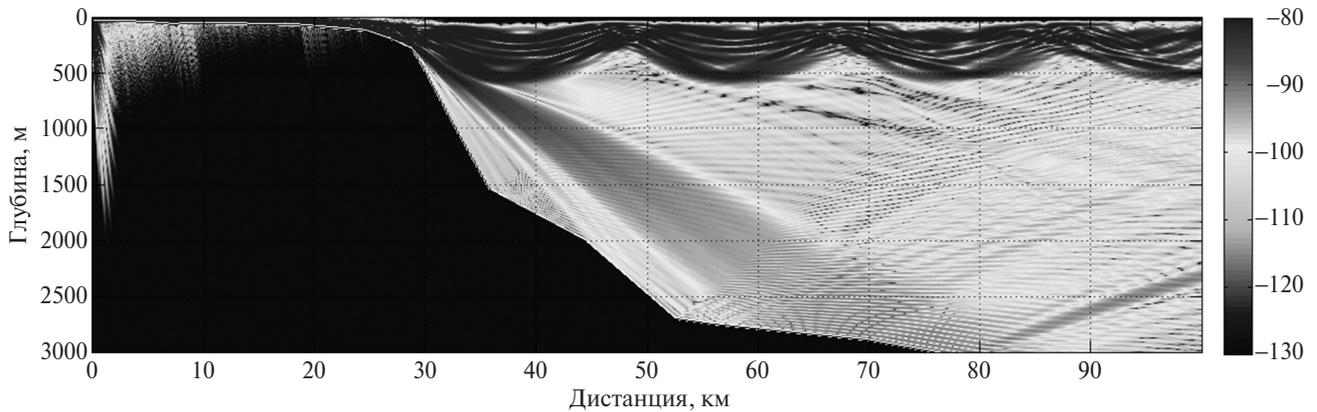
Для обоснования методического и технического обеспечения экспериментальных работ было выполнено математическое моделирование процесса распространения акустической энергии для условий эксперимента методом широкоугольного параболического уравнения (ШПУ) [8, 9].

Результаты расчётов для частоты 400 Гц представлены на рис. 1 (для большей наглядности показаны только первые 100 км трассы). Видно, что звуковое поле в глубоком море, возбуждаемое тональным источником на шельфе, до глубины 500 м форми-

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

\*E-mail: [golov\\_alexander@inbox.ru](mailto:golov_alexander@inbox.ru)

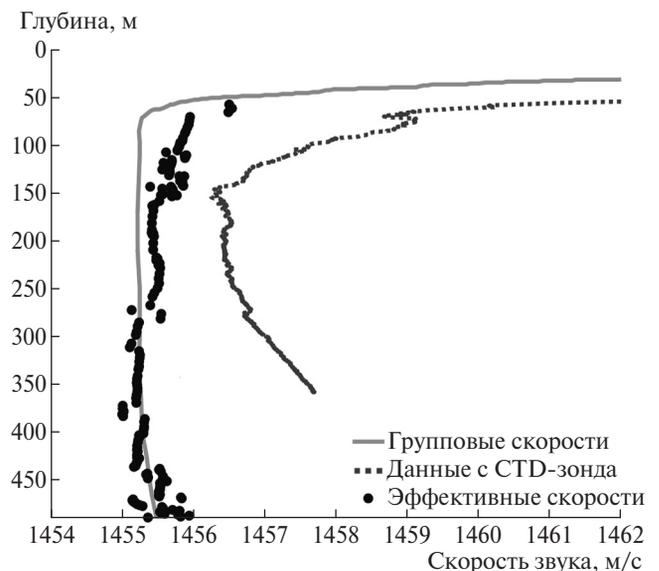


**Рис. 1.** Контурный график интенсивности звукового поля в децибеллах относительно 1 м от источника для частоты 400 Гц, рассчитанный с помощью широкоугольного параболического уравнения.

руется модами низших номеров в виде слабо выраженных зон тени, которые равномерно засвечены модами высших номеров. Это подтверждено экспериментально и обеспечило устойчивый приём навигационных сигналов при решении целевой задачи. Для теоретической оценки эффективных скоростей распространения навигационных сигналов в точках приёма в зависимости от глубины был использован модовый подход (метод нормальных волн), хотя обычно считается, что распространение звука в глубоком океане удобнее описывать в рамках лучевой теории.

В методе нормальных волн звуковое поле для каждой частоты может быть представлено в виде модового разложения, а импульсных сигналы, в свою очередь, могут быть представлены как суперпозиции модовых импульсов. Ввиду устойчивости результатов описанного ниже анализа при изменении частот в интервале от 300 до 500 Гц (на котором сосредоточена энергия навигационных сигналов) оказывается возможным выполнять оценки эффективных скоростей по одной лишь центральной частоте, составляющей 400 Гц. С каждой модой на этой частоте может быть ассоциирован некоторый угол распространения волн (относительно оси ПЗК), а также слой её локализации, вне которого модовая функция экспоненциально затухает (границы этого слоя могут быть ассоциированы с точками заворота луча, связанного с модой) [10, 11]. В глубоком море групповые скорости обычно растут с номером моды (т.е. с увеличением соответствующего ей угла распространения относительно оси ПЗК). Кроме того, известно, что ввиду полноты системы модовых функций доля энергии звукового поля, переносимая модой некоторого номера, быстро убывает с увеличением этого номера. Иными словами, основная часть энергии сигнала переносится модами малых номеров (с 1 по 20 в нашем случае).

Анализ групповых скоростей мод может быть использован для решения задачи определения расстояний акустическими средствами, так как эффективная скорость распространения сигнала в горизонтальном направлении определяется именно соответствующей групповой скоростью. Для решения задачи акустической дальнометрии на некотором горизонте (не обязательно совпадающем с осью ПЗК) необходимо оценить групповую скорость моды с наименьшим номером и интервал (вертикальной) локализации модовой функции на заданном горизонте. Результаты такого расчёта представлены сплошной кривой на рис. 2. На этом же рисунке приведено вертикальное распределение скорости звука, измеренное гидрологическим зондом в точке приёма (штрихпунктирная кривая).



**Рис. 2.** Результаты сравнения групповых скоростей наиболее медленных мод с эффективными скоростями максимальных приходов.

Как было отмечено ранее, группа мод наименьших номеров обычно соответствует наименьшим групповым скоростям и наибольшим интенсивностям. Поэтому при решении задач дальнометрии *in situ*, в случае наблюдения нескольких приходов для данного горизонта, следует опираться на наиболее поздние из них, как правило, имеющие большую амплитуду.

Расчёты показывают, что для горизонтов от 50 до 500 м можно считать групповую скорость равной приблизительно 1455,3 м/с. Результаты численных исследований позволили эффективно спланировать и осуществить экспериментальные работы для выполнения целевой установки.

Методически исследования строились таким образом, чтобы реализовать измерения импульсных характеристик и эффективных скоростей распространения звука в волноводе, включающем шельф и глубокое море, при приёме низкочастотных фазоманипулированных сигналов на различных глубинах и удалении от ИНС на 198 км. Эксперимент заключался в приёме сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником, расположенным на шельфе, и вычислении импульсных характеристик волноводов путём свёртки принятых сигналов с репликой излучённого. В 150 м от береговой черты на глубине 34 м был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель. Один раз в минуту излучались сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности, 1023 символа, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 400 Гц. Длительность сеанса излучения составила около 3 ч.

Для приёма сигнальной информации применялась специально разработанная распределённая вертикальная приёмная система, которая состоит из нескольких автономных ненаправленных гидрофонов, размещаемых в произвольных точках на фале длиной 500 м, который соединён с дрейфующей вехой. На вехе установлен GPS-приёмник с передачей информации о местоположении системы по радиоканалу на обеспечивающее судно. Каждый автономный гидрофон представляет собой устройство, предназначенное для непрерывной регистрации звукового давления и текущей глубины точки приёма сигналов.

В заданной точке трассы на удалении 198 км от ИНС с яхты «Светлана» была осуществлена постановка приёмной системы. В данной работе обсуждаются результаты измерений с одного гидрофона, который погружался от поверхности до глубины 495 м. Гидроакустическая информация в не-

прерывном режиме принималась при погружении и подъёме. Рисунок 3 наглядно иллюстрирует весь процесс проведения эксперимента. Наблюдаются процессы погружения и подъёма гидрофона, дрейф приёмной системы и импульсные отклики волновода. Три вкладки рисунков позволяют в любой момент времени определить импульсную характеристику волновода в зависимости от глубины погружения нижнего гидрофона, времени прохождения сигнала и расстояния между корреспондирующими точками.

Анализ данных, приведённых на рис. 3, показывает, что сигнал начинает детектироваться с горизонта 78 м. В диапазоне глубин 150–440 м наблюдается стабильная картина импульсных откликов с амплитудами, значительно превосходящими уровень корреляционных шумов. При этом в диапазоне глубин 150–200 м (глубина оси ПЗК) фиксируется в основном один приход акустической энергии, а глубже энергия распределяется на три импульсных прихода. Ниже отметки 440 м также фиксируются три прихода, но с существенно меньшими амплитудами (рис. 4).

Для решения целевой задачи исследования были произведены расчёты эффективной скорости прохождения импульсных сигналов от ИНС до приёмников, расположенных на разных глубинах. Эффективные скорости рассчитывались путём деления значений расстояния между источником и приёмником на момент регистрации сигнала по данным GPS на время распространения, определённое по моменту регистрации максимального пика импульсного отклика. Результаты расчётов в виде точек представлены на рис. 2. Можно отметить, что значения эффективных скоростей с точностью до 1 м/с совпадают с результатами численных расчётов групповых скоростей на глубинах до 495 м и со значением скорости звука на оси ПЗК. Физически этот важный для практики результат может быть объяснён следующим образом. Максимальная концентрация акустической энергии вблизи оси ПЗК в виде одного импульса формируется сигналами, распространяющимися под углами, близкими к нулевым, со скоростью, равной скорости звука на оси ПЗК [1–3]. Зафиксированная в эксперименте акустическая энергия, в виде троек импульсов распространяющаяся под большими углами на больших глубинах, проходит по лучевым траекториям большей длины, но с большими, чем на оси ПЗК, скоростями. Что и приводит к приблизительно равному эффективных (групповых) скоростей на всех глубинах.

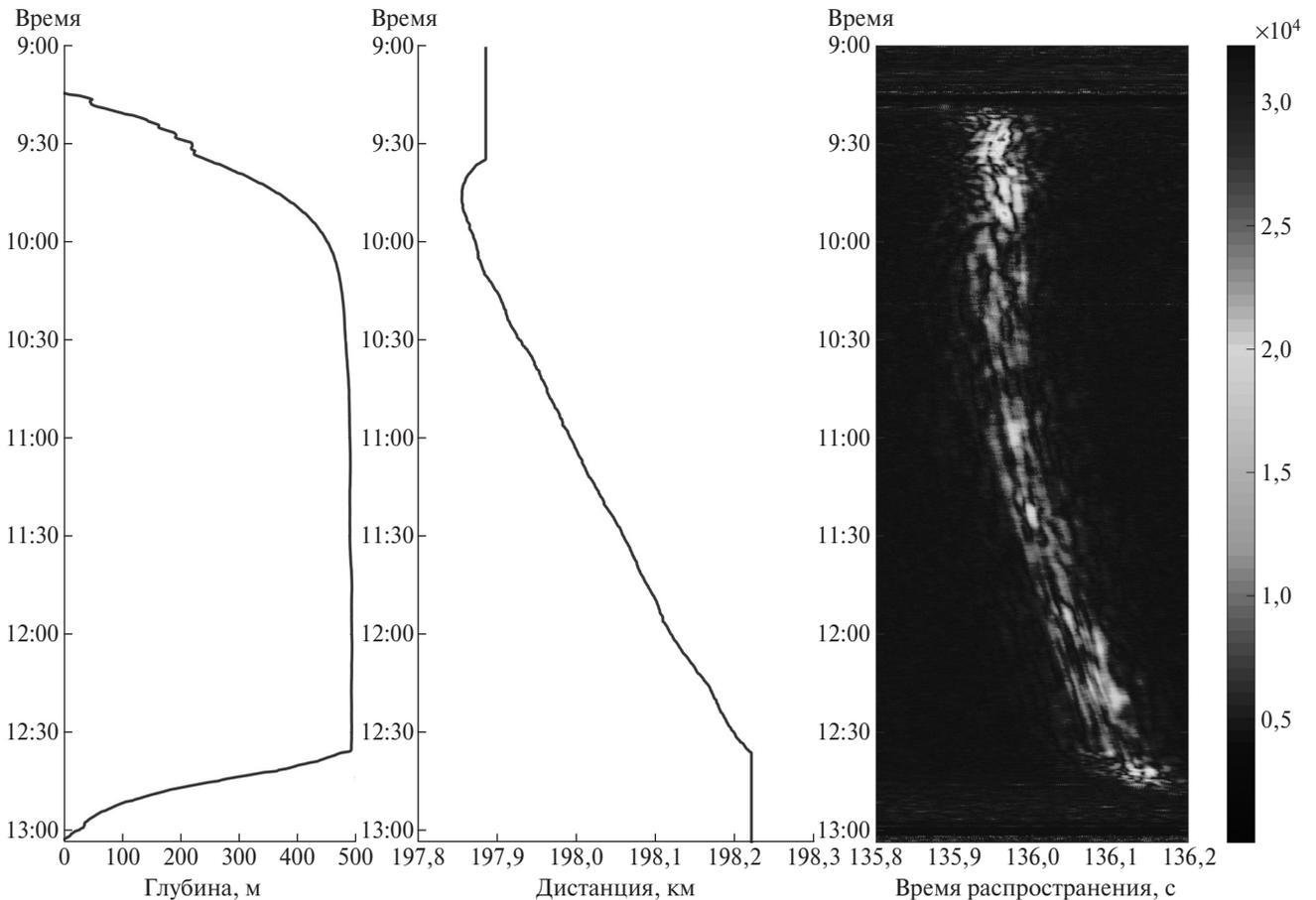


Рис. 3. Данные измерений в точке.

В ранних работах авторов [1–5] было экспериментально показано, что ошибки измерения расстояний акустическими методами при использовании в расчётах времени распространения навигационных сигналов и значений скорости звука на оси ПЗК не превышают 100–150 м при удалении АПА

до 200 миль. Следовательно, приведённые выше результаты о равенстве эффективных скоростей при приёме на глубинах до 500 м и скорости звука на оси ПЗК позволяют рассчитывать на такие же точности при осуществлении позиционирования АПА при выполнении миссий на глубинах до 500 м.

В заключение сформулируем основные результаты и выводы, полученные при выполнении целевой задачи исследования.

1. Показано, что ИНС, размещённый вблизи берега на глубине 35 м на шельфе Японского моря, развивающий акустическое давление 1500 Па/м, позволяет обеспечить необходимое превышение сигнала над помехой для корреляционной обработки навигационных сигналов на всех глубинах от 60 до 500 м при удалении от ИНС на 200 км. Звуковое поле в глубоком море, возбуждаемое тональным источником на шельфе, до глубины 500 м формируется модами низших номеров в виде слабо выраженных зон тени, которые равномерно засвечены модами высших номеров. Глубины от 60 до 500 м засвечены равномерно, что позволяет обеспечивать устойчивый приём навигационных сигналов в любом слое между этими горизонтами.

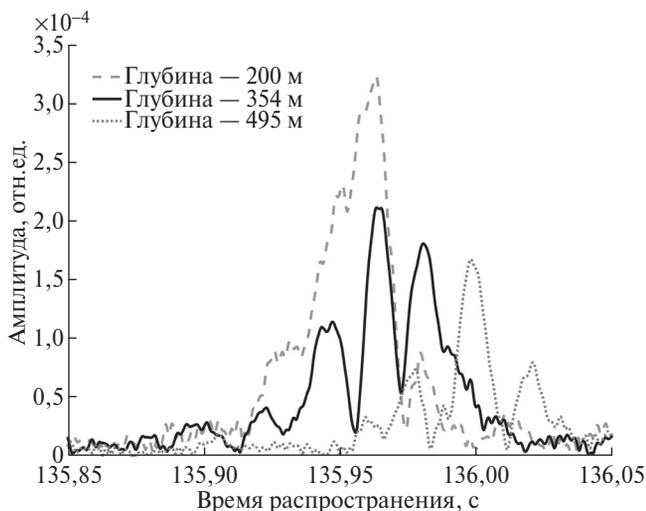


Рис. 4. Структура импульсных откликов на разных горизонтах приёма сигнала. Точка 198 км.

2. Структура импульсной характеристики волновода с глубиной существенно изменяется. Вместо одного мощного импульса при приёме на оси ПЗК на больших глубинах принимаются до трёх импульсов, разнесённых по времени на 20–30 мс.

3. Теоретические расчёты с использованием метода параболического уравнения для модельного волновода, воспроизводящего батиметрию и гидрологию экспериментальной трассы, показали хорошую применимость для физической интерпретации полученных в эксперименте результатов и анализа пространственной интерференционной структуры звукового поля в волноводе. Расчёты групповых скоростей мод для центральной частоты импульсного сигнала и анализ распределения энергии отдельных мод по глубине позволяют с точностью до 1 м/с (для трассы протяжённостью 200 км) предсказать наблюдаемые в эксперименте эффективные скорости распространения сигналов на глубинах до 495 м.

4. Экспериментально и теоретически показано, что значения эффективных скоростей в интервале глубин от 60 до 495 м почти не зависят от горизонта наблюдения и оказываются близкими скорости звука на оси ПЗК. Это позволяет обеспечивать позиционирование АПА на этих глубинах с ошибкой, не превышающей 150 м.

Таким образом, результаты натурных экспериментов и теоретических расчётов показали возможность эффективного решения задач позиционирования АПА при их функционировании на глубинах до 500 м. Этот факт имеет большое прикладное значение, так как при выполнении АПА сложных миссий на больших глубинах можно осуществлять позиционирование без всплытия на глубину оси ПЗК при наличии достаточного превышения сигнала над помехой.

#### 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. *Акуличев В.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А.* Применение псевдослучайных сигналов для подводной дальнометрии на шельфе // *ДАН.* 2010. Т. 432. № 4. С. 541–543.
4. *Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н.* Пилотный акустический эксперимент по определению координат подводного объекта в шельфовой зоне Японского моря // *ДАН.* 2010. Т. 433. № 3. С. 394–396.
5. *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.
6. *Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.А., Голов А.А.* Пат. № 2469346 С1, РФ. Способ позиционирования подводных объектов // *Бюл.* 2012. № 34.
7. *Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н.* Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // *ДАН.* 2009. Т. 426. № 6. С. 821–823.
8. *Попов А.В., Хозиоский С.А.* // *ЖВМиМФ.* 1977. Т. 17. № 2. С. 527–533.
9. *Авилов К.В.* // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. № 2. С. 240–244.
10. *Trofimov M.Y., Petrov P.S., Zakharenko A.D.* A Direct Multiple-Scale Approach to the Parabolic Equation Method // *Wave Motion.* 2013. V. 50. P. 586–595.
11. *Katsnelson B.G., Petnikov V.G., Lynch J.F.* Fundamentals of Shallow Water Acoustics. N.Y. etc.: Springer, 2012.

## ON DEEP-WATER RECEPTION OF PSEUDORANDOM ACOUSTICAL SIGNALS PROPAGATING FROM THE SHELF ZONE TO THE DEEP OCEAN

Academician of the RAS V. A. Akulichev<sup>1</sup>, Yu. N. Morgunov<sup>1</sup>,  
A. A. Golov<sup>1</sup>, S. I. Kamenev<sup>1</sup>, P. S. Petrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science,  
Vladivostok, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation*

Received February 26, 2019

The results of an experiment conducted in September 2017 to substantiate the applicability of the “acoustic mudslide” effect when solving the positioning problems of autonomous underwater vehicles in cases of their operation at depths substantially exceeding the depth of the axis of the underwater sound channel are discussed. The results of the experimental studies and numerical analysis of the effect of an acoustic energy focusing in the near-bottom layer of the shelf and its transition into deep-water (up to 500 m) layers of the Sea of Japan for summer-autumn hydrological conditions are presented. Mathematical modelling of the propagation of acoustic waves in a model waveguide reproducing the experimental conditions using the parabolic equation method has been performed. The observed effective signal propagation speeds are explained using the normal wave method.

*Keywords:* underwater sound channel, group velocities, effective velocities, deep-water reception, complex signals.