

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОГО
НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Г.И. Долгих^{1*}, А.Ф. Шербатюк², С.С. Будрин¹, В.А. Чупин

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН

**dolgikh@poi.dvo.ru*

Аннотация

В работе описывается эксперимент, проведенный с участием автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА), оснащенного высокоточной гидроакустической измерительной аппаратурой, низкочастотным гидроакустическим излучателем, а так же береговыми лазерными деформографами. Целью данного эксперимента являлось изучение пространственно-временного распределения поля давления, создаваемого низкочастотным гидроакустическим излучателем на шельфе клиновидной формы, а также выявление закономерностей трансформации гидроакустической энергии в сейсмическую. В ходе анализа и обработки полученных экспериментальных данных, была построена общая картина пространственного распределения поля гидроакустического давления на шельфе убывающей глубины, разработаны алгоритмы построения вертикальных разрезов поля давления по глубине на произвольном расстоянии от излучателя, по которым, в свою очередь можно вычислять горизонтальное распределение гидроакустической энергии на всем протяжении трассы излучения. По вертикальным распределениям давления, в представленной работе, были сделаны некоторые заключения о взаимодействии гидроакустического сигнала с дном и трансформации его в сейсмоакустический сигнал. Представлены результаты расчетов горизонтального распределения энергии и их сравнения с теоретически рассчитанными данными.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, автономный обитаемый подводный аппарат, деформограф, пространственное распределение поля давления, шельф, трансформация гидроакустической энергии.

FEATURES OF APPLICATION
AN AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER
VEHICLE AT STUDYING THE SPATIAL STRUCTURE
OF HYDROACOUSTIC FIELDS

G.I. Dolgikh^{1*}, A.F. Scherbatyuk², S.S. Budrin¹, V.A. Chupin¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS*

²*Institute of Marine Technology Problems FEB RAS*

*dolgikh@poi.dvo.ru

Abstract

The paper describes an experiment conducted with the participation an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) was equipped with high-precision hydroacoustic measuring equipment, a low-frequency hydroacoustic radiator, and coastal laser strainmeters. The aims of this experiment was to study the spatio-temporal distribution of the pressure field, created by a low-frequency radiator on a wedge-shaped shelf, as well as to identify patterns of transformation of hydroacoustic energy into seismic. During the analysis and processing of the obtained experimental data, a general picture of the spatial distribution of the field of hydroacoustic pressure on the shelf of decreasing depth was gained, algorithms for constructing vertical layer of the pressure field by depth at an arbitrary distance from the radiator were developed, from which, in turn, it is possible to calculate the horizontal distribution of hydroacoustic energy all along the radiation path. By the vertical pressure distributions, in the present work, some conclusions were inferred about the interaction of the hydroacoustic signal with the bottom and its transformation into a seismic signal. The results of calculations of the horizontal energy distribution and their comparison with theoretically calculated data are presented.

Keywords: hydroacoustic radiator, autonomous uninhabited underwater vehicle, strainmeter, spatial distribution of the pressure field, shelf, transformation of hydroacoustic energy.

Orcid ID Dolgikh G.I. 0000-0002-2806-3834

Введение

При проведении различных гидроакустических исследований фундаментального и прикладного характеров на шельфах различных конфигураций крайне важно знание о пространственно-временном

распределении создаваемого гидроакустического поля во всём водном пространстве. Особенно это важно при изучении закономерностей данного распределения на шельфах монотонно возрастающей или убывающей глубине и при изучении закономерностей трансформации излучённой гидроакустической энергии в сейсмоакустическую. Первые эксперименты такого рода были проведены в бухте Витязь Японского моря, в котором низкочастотный гидроакустический излучатель, генерирующий гармонический гидроакустический сигнал на частоте 33 Гц, располагался при глубине моря больше половины излучённой гидроакустической волны (35 м), а по направлению в берегу, т.е. при монотонно убывающей глубине, в определённых точках (при глубинах 30, 25, 20, 15, 10, 5 м) от поверхности до дна через 1 м проводилась регистрация гидроакустического сигнала, создаваемого в этих точках работающим излучателем [1]. При обработке полученных экспериментальных данных было установлено, что 1) при глубинах больше половины гидроакустической волны в среднем около 22% энергии гидроакустического излучателя трансформируется в энергию гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу; 2) при глубинах меньше половины гидроакустической волны энергия гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся на границах «вода-дно» и «воздух – земная кора»; 3) Около 72% энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа; 4) Около 78% излучённой гидроакустическим излучателем энергии трансформируется в энергию объёмных волн. Данные волны уходят в земную кору и не регистрируются лазерным деформографом. Эти первые результаты требуют дальнейших экспериментальных исследований, направленных на получение более подробной информации по распределению создаваемого гидроакустического поля по всей толще воды, что невозможно сделать без подводного носителя приёмной гидроакустической аппаратуры. В настоящее время данным носителем может быть только одно устройство – автономный необитаемый подводный аппарат. В этой статье обсуждаются некоторые экспериментальные результаты, полученные при использовании АНПА в экспериментах подобного рода.

Описание эксперимента

Осенью 2018 года пробный эксперимент был выполнен в бухте Витязь Японского моря по схеме, описанной ранее в [2]. Источник гидроакустического излучения 33 Гц располагался на расстоянии 1800 м от береговой полосы у противоположного берега бухты. При измерении низкочастотного гидроакустического поля в глубоководной части бухты и вблизи у берега использовался следующий алгоритм движения: АНПА погружается на заданную глубину и движется горизонтально относительно морской поверхности на заданное расстояние по условной линии, соединяющей береговую пост и гидроакустический излучатель, расположенный на удалении; при достижении определенной заранее точки АНПА выполняет разворот по траектории с минимальным радиусом и одновременно выполняет погружение на 1 м; после завершения разворота АНПА возвращается в точку старта, двигаясь по новому горизонту; при достижении точки начала работы производится повторный маневр с изменением глубины и направления движения (рис. 1).

Работы были выполнены в течение двух дней 15 и 16 сентября 2018 г. Программа-задание миссии № 1 заключалась в первоначальной отработке поставленной задачи и проходе АНПА по трассе распространения гидроакустического сигнала на заданных глубинах. Были выполнены три прохода АНПА прямолинейными галсами со стабилизацией глубины 3, 4 и 5 м в направлении от источника излучения к берегу по траектории 1 (рис. 2). Длина трассы измерения составила 968 м. Программа-задание миссии № 2 была

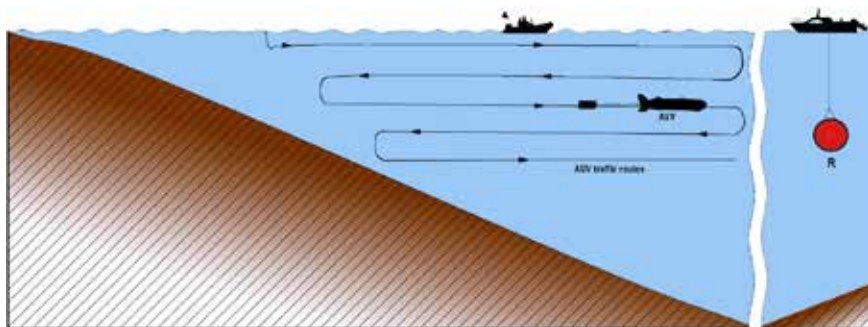


Рис. 1 Схема проведения эксперимента: R – гидроакустический излучатель, AUV – автономный подводный необитаемый аппарат на траектории.

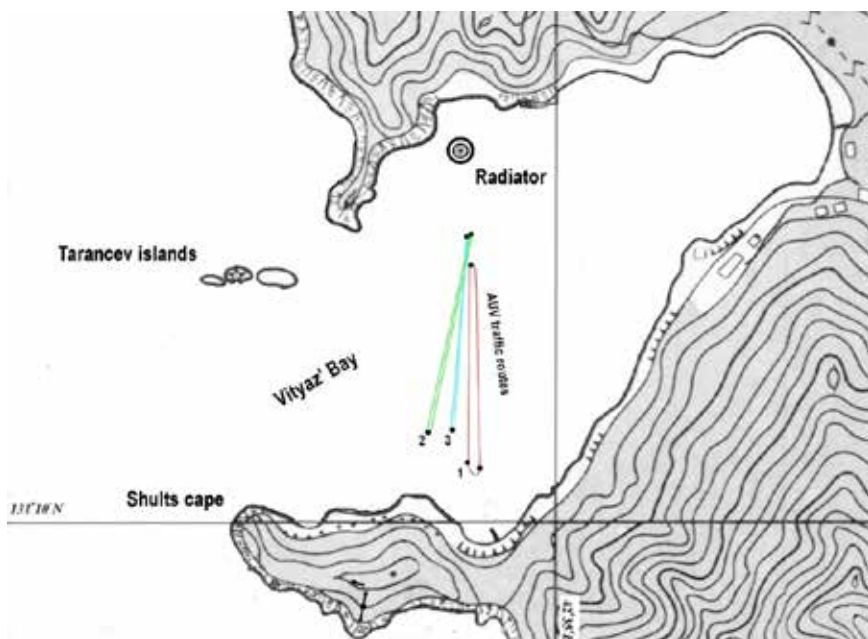


Рис.2 Карта-схема движения аппарата.

несколько скорректирована в соответствии с условиями рельефа дна. Было выполнено восемь прямолинейных галсов в направлении от источника излучения к берегу со стабилизацией глубин погружения 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 12 м. Соответственно, после прохода аппарата на глубине 2 м, был выполнен маневр разворота с погружением до 6 м и далее производилась смена глубины погружения в точках разворота с дискретностью 1 м. Длина галсов составляла 974 м. При проведении работ 16 сентября была выполнена программа прохождения АНПА по траектории 3 с изменением глубин в точках разворота в диапазоне от 13 до 22 м. Длина каждого галса составила 950 м.

Обработка экспериментальных данных

В первую очередь, при обработке экспериментальных данных производилась временная привязка данных приемной гидроакустической аппаратуры к данным АНПА, таким как координаты, скорость движения и глубина. Связано это с тем, что приемная аппаратура

так же как и АНПА являлись автономными устройствами, при этом их совместная синхронизация по времени осуществлялась GPS приемниками. После совмещения всех полученных данных по времени, производилась первичная обработка принятого гидроакустического сигнала, в которую входили фильтрация сигнала и спектральный анализ. По результатам спектрального анализа были выделены спектральные максимумы и их амплитуды, совпадающие по интервалу с данными регистрируемыми АНПА, а именно через каждые 5 секунд. Все данные были помещены в один массив, по которому было построено пространственное распределение гидроакустического давления по трассам движения автономного необитаемого подводного аппарата. Данное распределение представлено на рис. 3.

Как видно из рис. 3 наблюдаются так называемые зоны «тени» излучённого сигнала, которые связаны не с природными процессами, а с отсутствием экспериментальных данных в этих зонах. Это видно из рис. 4, на котором обозначены траектории движения автономного необитаемого подводного аппарата.

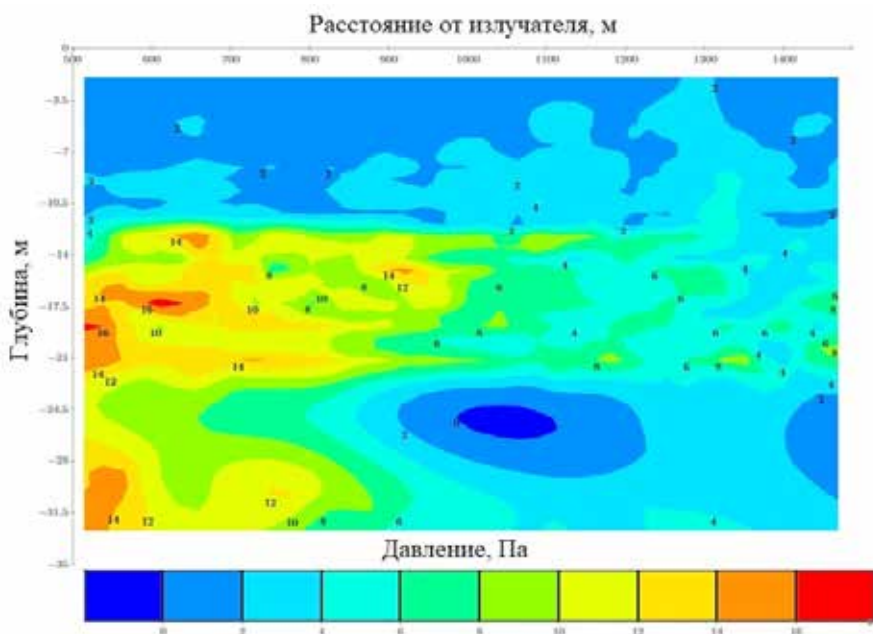


Рис. 3 Пространственное распределение излучённого гидроакустического сигнала по трассе движения автономного необитаемого подводного аппарата.

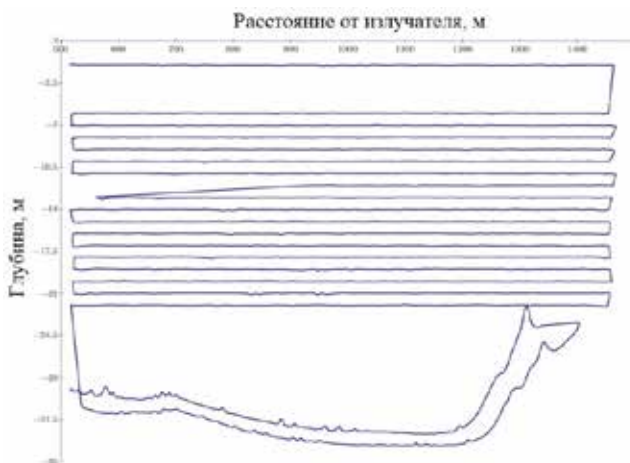


Рис. 4 Трассы движения автономного необитаемого подводного аппарата

В связи с выше сказанным, становится понятно, что производить анализ и вычисления по всей тоще воды будет некорректно, именно поэтому в дальнейшем в анализе и расчетах мы будем рассматривать только зону в которой присутствуют экспериментальные данные. Рассмотрим зону глубин от 6 до 21 м и используя общее пространственное распределение, представленное на рис. 3, сделаем вертикальные разрезы на произвольном расстоянии от излучателя, представляющие собой распределение давления по глубине.

Для построения распределения избыточного давления P по глубине h на расстоянии от излучателя x , была написана специальная программа в среде MathCad. Суть программы заключается в ведении новой функции работы с массивами экспериментальных данных имеющая общий вид, где переменные $[x]$ и $[h]$ являются одномерными массивами которые, могут быть заданы в виде ряда с шагом сколь угодно малой величины, от которой будет зависеть только длительность выполняемых расчетов. Таким образом, с помощью выше указанной функции, фиксируя значение одной из переменных, можно рассчитывать не только вертикальное, но и горизонтальное распределение давления. При всей своей простоте данного метода, основной сложностью являлось нестабильность скорости движения АНПА, т.е. за равные промежутки времени он проходил разные расстояния, так

же имелись небольшие вариации движения по глубине. Так как измерения давления производились с непосредственной привязкой по времени, для начала необходимо было придумать алгоритм осреднения и автоматического поиска переменных при фиксации одной относительно другой, что было достаточно непростой задачей, которая была успешно решена.

При фиксированных значениях расстояний от излучателя, с шагом в 100 метров, нами были получены массивы данных распределения давления по глубине. По полученным массивам были построены кривые регрессии, представляющие собой полиномы 3-6 степени, которые в должной мере описывают распределение давления. На рис. 5 представлены графики некоторых распределений.

Из рис. 5 (а) можно увидеть, что на самом близком расстоянии от излучателя, распределение акустического избыточного давления имеет ярко выраженный максимум примерно на глубине акустической оси излучателя, что достаточно правдоподобно. На рис. 5 (б, в) профиль распределения сохраняет свою форму, однако максимальное значение профиля уменьшается с распространением, а на рис. 5 (в) становится более пологим и похожим на плоскую волну. При приближении к берегу (рис. 5 (г)), уже можно видеть неравномерную структуру распределения, имеющую несколько максимумов, что может свидетельствовать о более интенсивном взаимодействии поля давления с дном, и трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую.

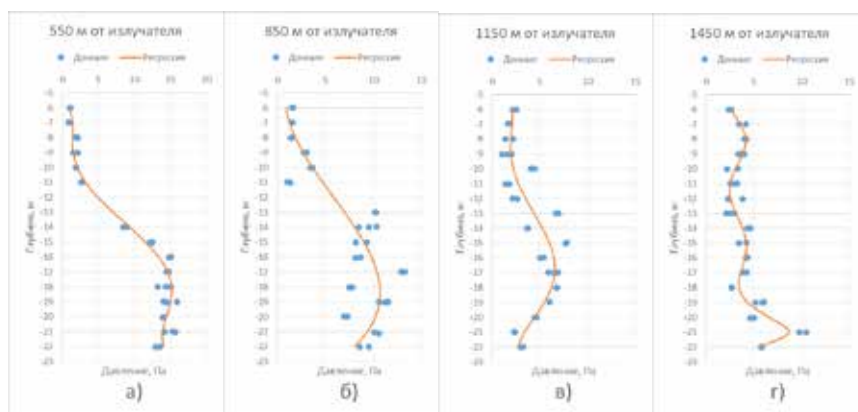


Рис. 5. Распределение давления по глубине, а) 550 метров от излучателя, б) 850 метров от излучателя, в) 1150 метров от излучателя, г) 1450 метров от излучателя

Еще одним неоспоримым плюсом данного алгоритма расчетов является возможность вычисления удельной энергии по данным распределения давления, а также построения распределений энергии от расстояния. Имея уравнение регрессии, описывающее вариации давления по глубине, достаточно ввести его в выражение для удельной энергии. Допустим, распределение давления является полиномом 3 степени, график данного полинома представлен на рис. 5 (б), тогда уравнение распределения можно записать как:

$$P(h) = -0,0089 \cdot h^3 + 0.3207 \cdot h^2 - 2.6832 \cdot h + 7.4084$$

Таким образом, выражение для расчета удельной энергии акустического давления, создаваемого излучателем, имеет следующий вид:

$$E_{yo}(h) = \frac{1}{2\rho c^2} \int_{h_2}^{h_1} P(h) dh \quad (1)$$

Используя выражение (1) и уравнения регрессий, были рассчитаны энергии акустического сигнала начиная с расстояния 550 метров от излучателя через каждые 100 метров, полученные данные, были сведены в таблицу 1, представленную ниже. Также в таблице приведено теоретическое распределение излученной энергии с учетом цилиндрической расходимости, имеющей вид E/R , где E – энергия, а R – расстояние от излучателя.

Таблица 1

Излученная энергия и энергия с учетом цилиндрической расходимости

Расстояние от излучателя, м	Удельная энергия	Цилиндрическая расходимость
550	3.28E-07	3.28E-07
650	3.332E-07	3.28E-09
750	2.326E-07	1.64E-09
850	1.914E-07	1.09333E-09
950	1.923E-07	8.2E-10
1050	9.36E-08	6.56E-10
1150	7.054E-08	5.46667E-10
1250	6.692E-08	4.68571E-10
1350	5.623E-08	4.1E-10
1450	4.838E-08	3.64444E-10

По данным расчета, приведенным в таблице 1, был построен график распределения энергии от расстояния и график энергии с учетом цилиндрической расходимости. Данные графики представлены на рис. 6.

При анализе результатов, представленных на рис. 6. можно сказать, что пространственное распределение излучённой гидроакустической энергии в этом слое воды подчиняется степенному закону распределения, в соответствии с которым энергия от излучателя уменьшается медленнее, чем при цилиндрической расходимости. С

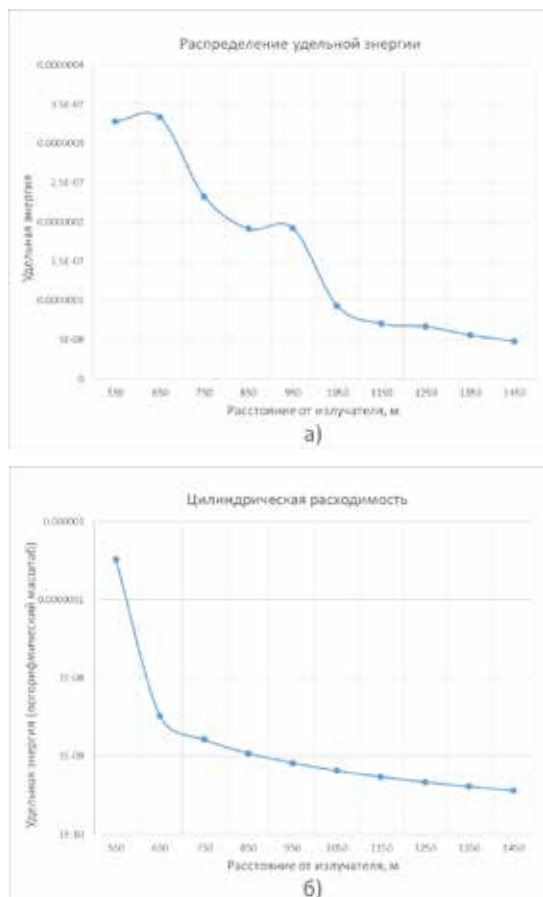


Рис. 6. Пространственное распределения энергии от расстояния (а) и график распределения энергии с учетом цилиндрической расходимости (б).

одной стороны, это может быть связано с отсутствием экспериментальных данных в зонах тени, но с другой стороны с нелинейными процессами, при которых гидроакустический сигнал «подпитывается» средой распространения. Второе утверждение может быть связано с существованием так называемых акустических линз в водной среде.

Заключение

По результатам обработки и анализа экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента на шельфе монотонно убывающей глубины, было построено общее пространственное распределение избыточного давления, создаваемое низкочастотным гидроакустическим излучателем. Были разработаны алгоритмы автоматизации обработки с большими массивами экспериментальных данных, благодаря которым можно рассчитывать и строить разрезы распределения давления как по вертикали, так и по горизонтали. По приведенным в данной статье вертикальным разрезам можно сделать вывод, что на небольших расстояниях от излучателя давление концентрируется на акустической оси излучателя, но с увеличением расстояния становятся более пологими и имеют меньшую амплитуду, что может свидетельствовать не только о классическом затухании в жидкой среде, но и о частичном переходе энергии из жидкого полупространства в твердое, при выходе гидроакустических волн на мелководье. Представлены расчеты и значения энергий, рассчитанных по вертикальным распределениям полей давлений. Построены горизонтальное пространственное распределение гидроакустической энергии и теоретическое распределение с учетом цилиндрической расходимости, которые имеют разный характер, что может быть связано как с недостатком экспериментальных данных, так и с нелинейными процессами в среде.

В ходе работы над данным материалом, стало ясно, что для получения полной картины трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую, изучения закономерностей этой трансформации в зависимости от строения и состава пород морского дна, батиметрии, недостаточно полученных экспериментальных данных. Прежде всего необходимо изучение пространственно-временного распреде-

ления, создаваемого низкочастотным гидроакустическим излучателем гидроакустического поля, установления его зависимости от тонкой структуры гидрофизического поля шельфовой области моря. Для этого необходимо проводить измерения исследуемых параметров во всей толще воды с пространственным разрешением по горизонтали и вертикали не хуже 1 м (лучше меньше). Эту задачу невозможно выполнить без применения подводного носителя заданных приёмных систем. В настоящее время эту функцию может выполнить эффективно только автономный необитаемый подводный аппарат.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке подпрограммы № 18-1-004 «Изучение фундаментальных основ взаимодействия разномасштабных гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов...».

Литература

1. Grigory I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, and Sergey V. Yakovenko. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017. PP. 1990-1996.
2. Grigory I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, and Sergey V. Yakovenko. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017. PP. 1990-1996.
3. Dolgikh G.I., Chupin V.A., Scherbatyuk A.F. A Method for the Space-Time Distribution Studying of the Hydroacoustic Fields Near the Bottom Using AUV // Proceedings 2017 IEEE OES International Symposium Underwater Technology. 2017. C. 7890277.

References

1. Grigory I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, and Sergey V. Yakovenko. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth. J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017. PP. 1990-1996.
2. Grigory I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, and Sergey V. Yakovenko. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth. J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017. PP. 1990-1996.
3. Dolgikh G.I., Chupin V.A., Scherbatyuk A.F. A Method for the Space-Time Distribution Studying of the Hydroacoustic Fields Near the Bottom Using AUV. Proceedings 2017 IEEE OES International Symposium Underwater Technology. 2017. C. 7890277.