

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО- ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ОБЛАСТИ МОРЯ

**В.А. Чупин^{1,3},
Г.И. Долгих^{1,3},
А.Ф. Щербатюк^{2,3}**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН²
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
Дальневосточный федеральный университет³

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-временного распределения гидроакустического поля давления на клиновидном шельфе, созданного низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой излучения 33 Гц и зарегистрированного аппаратно-программным гидроакустическим комплексом на базе автономного необитаемого подводного аппарата MARK и высокочувствительной гидроакустической приёмной системы. В ходе обработки экспериментальных данных получено пространственно-временное распределение гидроакустического поля в прибрежной зоне бухты Витязь.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из главных фундаментальных задач современной гидрофизики, гидроакустики и геоакустики являются задачи, связанные с изучением особенностей генерации, распространения и трансформации различных колебаний и волн звукового и инфразвукового диапазонов в условиях глубокого и мелкого моря при слоистой и нерегулярной водной структуре, различных наклонах и рельефе морского дна, при различных упругих характеристиках верхнего слоя морской земной коры, особенностях его строения и структуры. Если для глубокого моря данные задачи в линейном случае решены теоретически и экспериментально, то для мелкого моря и «моря промежуточной глубины» они даже

теоретически решены с большим приближением. Еще более сложная задача, которая требует скорейшего решения, связана с изучением условий генерации и распространения гидроакустических волн различных частот по шельфу в условиях непрерывного изменения отношения длины излучённой волны к глубине моря. Неясно, как во всём пространстве водной среды для разных частот будет выглядеть гидроакустическое поле и его зависимость от условий генерации, наклона морского дна, строения и структуры верхнего слоя морской земной коры. Также нет ясности

¹ 690013, Владивосток, ул. Балтийская, 43.
Тел.: (423) 270843. E-mail: chupin@poi.dvo.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел.: (423) 2432416. E-mail: scherba@marine.febbras.ru

³ 690000, Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел.: (423) 2433472.

о механизме трансформации энергии гидроакустических колебаний и волн в энергию геоакустических волн. Такие задачи частично решались при выполнении множественных экспедиционных исследований с постановкой в определённых точках шельфа различных излучающих и приёмных систем с попытками дальнейшего моделирования распространения акустических полей [1–3], что, как показывают дополнительные экспериментальные исследования, не всегда адекватно отображало истинную природу процесса.

Для решения всех вышеуказанных задач (гидрофизических, гидроакустических, геоакустических) необходимо использовать приёмные системы, которые расположены на достаточно мобильных подводных носителях, движущихся под водой с постоянной скоростью, с хорошей привязкой к координатам и различным горизонтам. Для этой цели лучшим средством являются автономные необитаемые подводные аппараты, оснащённые высокочувствительными современными регистраторами излучённых сигналов. В качестве излучающих систем необходимо использовать гидроакустические излучатели, по возможности полностью перекрывающие интересующий диапазон частот. Выполнение данных задач можно проводить с применением надводных транспортных средств, наиболее подходящими из которых являются маломерные и энергосберегающие необитаемые автономные надводные аппараты.

Указанные выше работы никогда не выполнялись. Пробные эксперименты проводились с буксировкой гидроакустических излучателей, генерирующих гармонические сигналы, в интересах изучения эффекта Доплера, модуляционного воздействия низ-

кочастотных гидрофизических процессов на гидроакустический сигнал. Для выполнения поисковых научных исследований на начальном уровне необходимо было выполнить задачу по созданию аппаратно-программного комплекса, состоящего из подводного автономного необитаемого аппарата, широкополосных высокочувствительных гидроакустических приёмных систем и различных гидроакустических излучателей, и отработать методику функционирования данного комплекса в автоматическом режиме, провести исследования возможности определения в оперативном режиме пространственно-временной трёхмерной структуры водной среды.

■ Аппаратный комплекс и методика эксперимента

Для выполнения работ по изучению закономерностей трансформации гидроакустических колебаний на границе раздела сред в прибрежной зоне и пространственно-временного распределения акустического поля в толще воды был создан аппаратный комплекс на основе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) MARK. В комплекс входит модульный набор оборудования, состоящий из носителя и информационно-измерительной системы,

обеспечивающих его автономную работу в течение продолжительного времени [4]. В корпусе носителя размещаются движительно-рулевой комплекс, системы электропитания и программного управления и контроля аппаратом, навигационный комплекс, измерительные датчики, модули связи и средства обнаружения. В состав аппаратно-программного комплекса, находящегося в отдельном модуле, входит дополнительное оборудование в следующем составе: гидрофон Bruel & Kjaer 8104, позволяющий проводить измерения в диапазоне от 0,1 Гц до 120 кГц с высокой чувствительностью, предусилитель NEXUS, аналого-цифровой преобразователь устройства записи и хранения данных, система энергообеспечения. Использование такого модуля обеспечивает новые возможности АНПА при исследовании пространственного распределения гидроакустических полей.

Перед началом работ модуль информационно-измерительной системы соединяется с носителем АНПА. Далее проводится выполнение комплекса мер по обеспечению нейтральной плавучести и баланса комплекса. На рис. 1 показан аппаратный комплекс, прошедший подготовку к проведению экспериментальных работ.



Рис. 1. Аппаратный комплекс на основе АНПА MARK

Экспериментальные работы выполнялись в бухте Витязь МЭС ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца». Ранее в [5] была описана методика проведения измерений при работе аппарата в толще воды исследуемой акватории. В ходе выполнения измерений АНПА движется по траектории типа меандр, по направлению от источника излучения к берегу и обратно. При этом могут использоваться два алгоритма работы аппарата. По одному из алгоритмов АНПА погружается на заданную глубину и движется горизонтально относительно морской поверхности на заданное расстояние по условной линии, соединяющей береговой экспериментальный пост и гидроакустический излучатель, расположенный на удалении в бухте Витязь. По другому алгоритму аппарат погружается на заданную глубину и движется параллельно дну на одном и том же расстоянии от дна по условной линии, соединяющей береговой экспериментальный пост и гидроакустический излучатель. В качестве источника излучения используется гидроакустическая излучающая система, позволяющая излучать гармонический и фазоманипулированный сигналы на частоте 33 Гц при наибольшей эффективности излу-

чения при погружении на глубину 15 м [6].

В бухте Витязь залива Посьета был проведен эксперимент по исследованию распределения давления гидроакустического поля в исследуемой зоне бухты по схеме, описанной ранее в [6]. Источник гидроакустического излучения 33 Гц располагался на расстоянии 1800 м от береговой полосы у противоположного берега бухты. При исследовании низкочастотного гидроакустического поля непосредственно в прибрежной зоне использовались оба алгоритма движения АНПА на разных глубинах относительно дна и поверхности воды, но с учетом того, что маневренность АНПА в таких условиях абсолютно ограничена, работа аппарата обеспечивалась с сопровождающего его плавсредства. С берегового поста производились программирование и запуск планов миссий по траекториям, указанным на схеме эксперимента цифрами 1 и 2 (рис. 2). Программа-задание миссии № 1 заключалась в проходе АНПА по трассе распространения гидроакустического сигнала на заданных глубинах. Выполнены два прохода АНПА прямолинейными галсами со стабилизацией глубины 2 и 6 м в направлении

от берега к источнику излучения. Программа-задание миссии № 2 заключалась в семи проходах прямолинейными галсами в направлении от источника излучения к берегу со стабилизацией заданной высоты над дном. Характеристика параметра высоты составляла 1,5 м, 2 м, 3 м, 4 м, 5 м, 6 м и 7 м. Аппарат выполнял короткий галс со стабилизацией глубины 2 м, а затем осуществлял стабилизацию заданной высоты над дном. Схема эксперимента и траектории выполнения миссий АНПА показаны на рис. 2.

После проведения экспериментальных работ модуль аппаратно-программного комплекса демонтируется с носителя АНПА, а с носителя информации проводится снятие экспериментальных данных и их обработка.

■ Обработка и анализ экспериментальных данных

В ходе синхронной обработки экспериментальных данных проводилось сравнение нескольких параметров, таких как глубина погружения, высота над уровнем дна, координаты погружения и всплытия, скорость движения, амплитуда регистрируемого гидроакустического излучения, предварительно

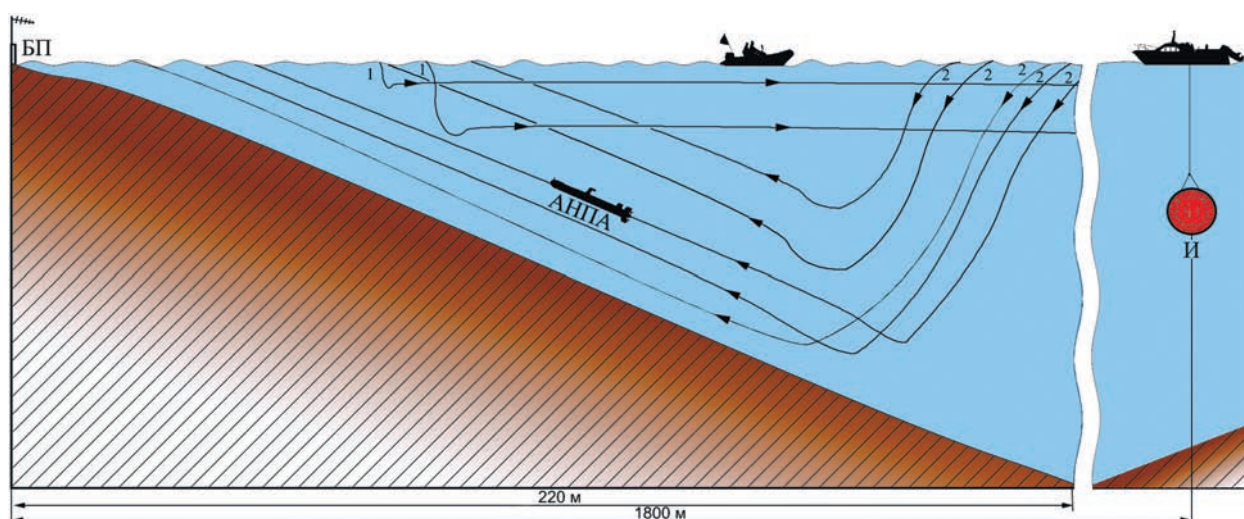


Рис. 2. Схема проведения эксперимента: И — гидроакустический излучатель, АНПА — автономный необитаемый подводный аппарат на траектории, БП — береговой пост управления; 1 — траектории миссии № 1; 2 — траектории миссии № 2

регистрируемая с чувствительностью 100 мВ/Па. Также остается возможность включить в сравнение такие параметры, как температура воды, соленость и электропроводность. В результате обработки выяснилось, что при движении АНПА по поверхности моря происходит перегрузка уровня принимаемого сигнала в результате ударного влияния поверхностного волнения на гидрофон. После погружения носовой части АНПА сигнал возвращается к нормальной форме.

По полученным результатам данных гидрофона последовательно выполнялся анализ амплитуды гидроакустического сигнала на равных последовательных участках при движении АНПА. При этом выполнялась синхронизация этих данных с глубиной погружения аппарата и глубиной моря в каждый момент времени. На рис. 3 показан один из участков синхронных данных, состоящий из сигнала гидрофона, его динамической спектрограммы и графиков глубины погружения АНПА и глубины моря.

В результате на основе полученного массива экспериментальных данных были построены диаграммы распределения величины давления низкочастотного гидроакустического излучения по трассе его распространения в приповерхностном слое моря на удалении от берега (рис. 4), а также в придонном слое прибрежной зоны (рис. 5). Рисунки представлены в виде пузырьковой диаграммы, позволяющей представить пространственное распределение величины акустического давления, рассчитанной с интервалом измерения 5 с. Ось абсцисс указывает расстояние от береговой полосы, ось ординат показывает глубину погружения. Диаметр пузырьков представляет величину акустического давления на частоте излучения гидроакустического источ-

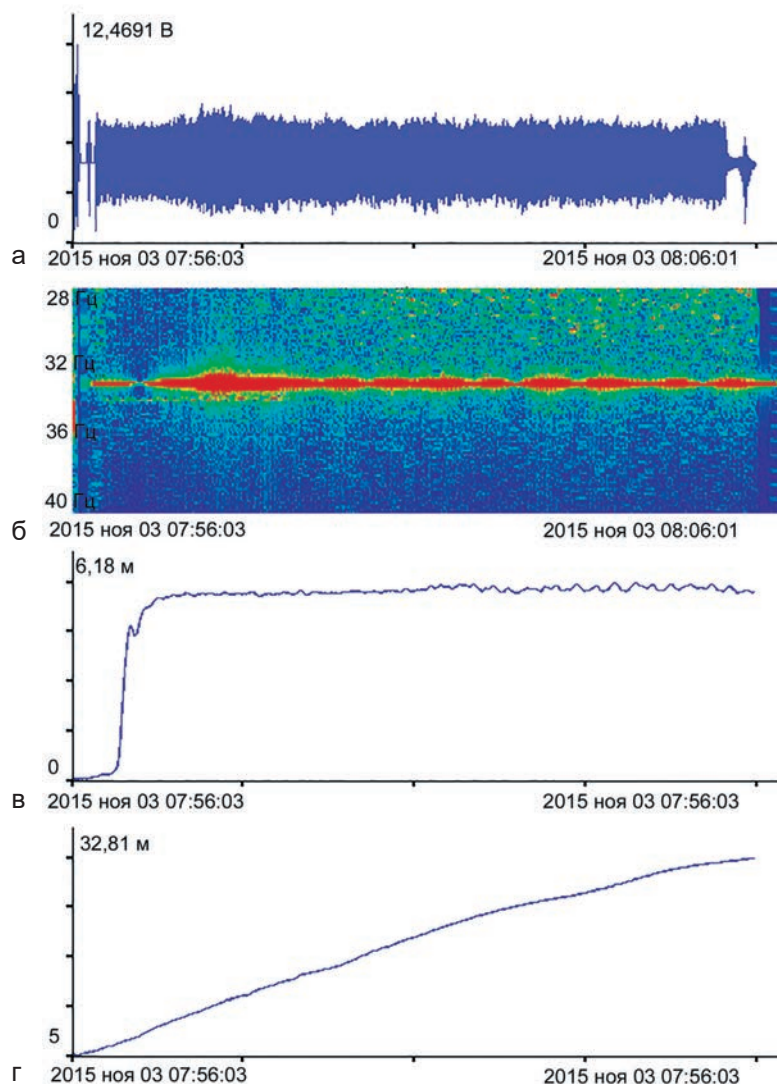


Рис. 3. Графики синхронных экспериментальных данных, полученных аппаратным комплексом: а – осциллограмма записи гидрофона; б – динамическая спектрограмма данных гидрофона; в – глубина погружения АНПА; г – график изменения глубины моря

ника. Распределение величины акустического давления составляет от 0,14 Па непосредственно возле берега, где диаметр имеет минимальное значение. Максимальное значение давления составляет 10,98 Па при глубине погружения 6 м и удалении от берега 203 м.

При длине волны излучения, составляющей около 45 м, большая часть энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию объёмных волн и затухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся на границах «вода–дно» [7]. Это утверждение выполняется при глубине моря меньшей, чем длина излучаемых волн. В таблице при-

ведены экспериментальные результаты, где Р – максимальная величина акустического давления ряда данных, S – удаление от берега, s – интервал ближайших значений S. Индексы 1 и 2 обозначают соответственно параметр глубины АНПА 2 и 6 м.

С учетом проведенных экспериментальных исследований можно сделать выводы, что в условиях мелкого моря близко к источнику излучения наблюдается низкий уровень гидроакустического сигнала. По результатам выполнения АНПА миссии № 1 при распространении сигнала наблюдаются его пучности, имеющие интервал,

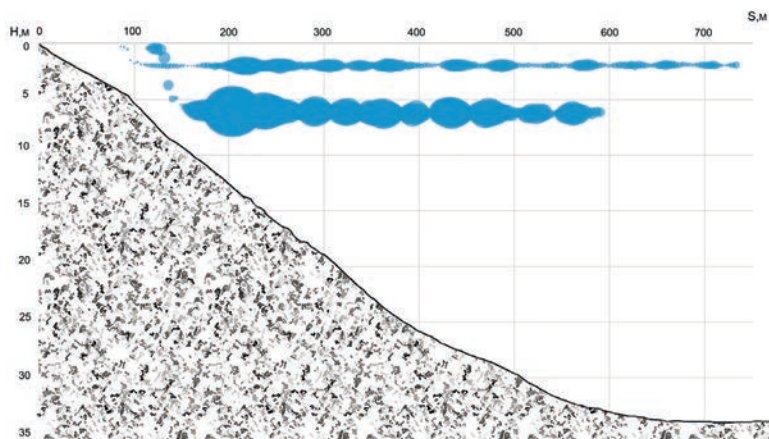


Рис. 4. Схема пространственного распределения давления акустического поля при выполнении АНПА миссии № 1

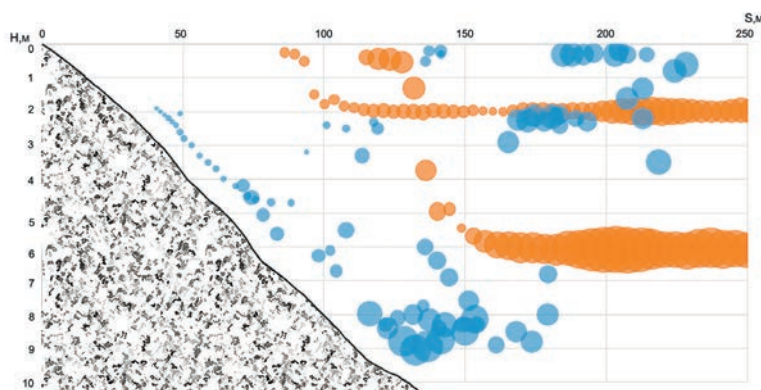


Рис. 5. Схема пространственного распределения давления акустического поля в прибрежной зоне при выполнении АНПА миссии № 2 (синий цвет) и миссии № 1 (красный цвет)

Данные измерения комплекса при проведении миссии № 1

P_1 , Па	S_1 , м	s_1 , м	P_2 , Па	S_2 , м	s_2 , м
4,005	216		10,99	203,31	
3,24	254,72	80,79	8,12	236,95	33,64
3,05	303,93	49,21	6,47	291,61	54,66
2,52	339,08	35,15	5,95	325,25	33,64
3,11	367,2	28,12	6,51	363,10	37,85
2,78	441,01	73,81	5,18	392,53	29,43
2,88	486,71	45,7	6,76	434,58	42,05
1,47	539,43	52,72	6,33	472,43	37,85
2,52	574,58	35,15	4,4	522,89	50,46
1,89	627,31	52,73	5,35	560,73	37,84
2,12	658,94	31,63			
1,85	704,64	45,7			

в среднем составляющий значение длины гидроакустической волны 33 Гц. При приближении акустических волн к побережью максимальные значения амплитуды исследуемого сигнала увеличиваются по логарифмическому закону до области, где глубина моря составляет 13,5 м. При дополнении результатами миссии № 2 до глу-

бин 8–9 м происходит снижение уровня сигнала в придонном слое и его равномерное распределение по всей толще со средним уровнем, составляющим 2,5 Па. Далее ближе к берегу амплитуда регистрируемого сигнала составляет 0,3–0,6 Па и окончательно пропадает в области, где глубина моря составляет 3 м.

В результате обработки экспериментальных данных регистрации уровня распределения поля гидроакустического излучения зарегистрированы области концентрации и разреженности остаточной акустической энергии. Определены и графически представлены уровни и интервалы распределения энергии гидроакустического излучения в пространстве. При использовании созданного аппаратного комплекса появилась уникальная возможность изучения пространственно-временного распределения акустической энергии в любой исследуемой акватории.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-0223 (обработка и интерпретация экспериментальных данных) и программы «Дальний Восток» (организация экспедиции) и гранта РНФ (проект № 14-50-00034) (разработка и реализация методики морских испытаний с использованием АНПА).

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Кабанов Н.Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41, № 2. С. 235–239.
2. Долгих Г.И. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // Акуст. журн. 1998. Т. 44, № 3. С. 358–361.
3. Долгих Г.И., Чупин В.А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 5. С. 628–632.
4. Долгих Г.И., Чупин В.А., Щербатюк А.Ф. Аппаратно-программный комплекс для исследования динамики гидросферно-литосферных процессов // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 156–157.
5. 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 // 2017 IEEE OES Int. Symp. Underwater Technology. Busan, South Korea, 2017. С. 789–277.
6. Чупин В.А., Будрин С.С., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., Ярошук И.О. Сезонная зависимость коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода–дно» // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 35–39.
7. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Yakovenko S.V. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // Journ. of the Acoust. Soc. of America. 2017. Vol. 142. P. 1990–1996.