**Г.И. Долгих, Sh. Piao, С.С. Будрин, Y. Song, С.Г. Долгих,
В.В. Овчаренко, В.В. Чупин, С.В. Яковенко, Y. Dong, X. Wang**

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА
ШЕЛЬФЕ УБЫВАЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ
НА ГРАНИЦЕ «ВОДА–ЗЕМНАЯ КОРА»**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43,
Тел.: 8(423)231-23-52, E-mail: chupin@poi.dvo.ru
Harbin engineering university, Acoustic science and technology laboratory*

Представлены результаты экспериментальных и модельных исследований закономерностей распространения низкочастотных гидроакустических сигналов 22 Гц в шельфовой области с убывающей глубиной и их трансформации в сейсмоакустические сигналы.

Ключевые слова: гидроакустические волны, излучатель, лазерный деформограф, трансформация, сейсмоакустические волны

Для решения прикладных задач изучения естественных и искусственных процессов и явлений, происходящих в Мировом океане, широко используются гидроакустические методы, позволяющие исследовать основные характеристики объектов и морского дна. Знание о закономерностях распространения гидроакустических сигналов очень актуально при исследовании сигналов, генерируемых естественными и искусственными морскими объектами, особенно в низкочастотном звуковом и инфразвуковом диапазонах, и распространяющихся из «глубокого» в «мелкое» море. Первые работы с низкочастотным гидроакустическим излучателем, генерирующим сигналы на частоте 33 Гц, позволили установить некоторые закономерности для данного частотного диапазона [1]. В продолжении исследований необходимо выяснить информацию о характере закономерности трансформации сигнала при понижении его частоты.

Эксперимент был поставлен в бухте Витязь Японского моря. Научно-исследовательское судно стояло на якоре в точке с глубиной 32 м, а на глубину 18 м был опущен низкочастотный гидроакустический излучатель электромагнитного типа [2], создающий в воде гармонические

сигналы на частоте 22 Гц. Вблизи излучателя выполнялась регистрация гидроакустического поля, по данным которой определялась плотность энергии, создаваемой в воде излучателем.

Излученный гидроакустический сигнал регистрировался гидрофоном с борта катера при постепенном удалении от источника излучения на расстояние до 1300 м в сторону берега при постепенно уменьшающейся глубине. В каждой точке приема от поверхности до дна проводилась регистрация на горизонтах через 1 м. По полученным данным гидрофона определялась амплитуда принятого сигнала на частоте 22 Гц. По этим данным в дальнейшем строилась кривая, описывающая уровень принятого гидроакустического сигнала, начиная от поверхности до дна.

На берегу трансформированные сейсмоакустические сигналы принимались береговым 52.5-метровым лазерным деформографом [1]. Амплитудно-частотная характеристика 52.5-метрового лазерного деформографа имеет линейный вид в инфразвуковом диапазоне, а в звуковом диапазоне – квадрат синуса с удвоенной амплитудой [3]. При регистрации сейсмоакустической волны продольного типа, распространяющейся вдоль оси лазерного деформографа со скоростью 2300 м/с, взятой в соответствии с [3], он регистрирует амплитуды волн на частотах 22 и 33 Гц, равных $2A_0$ и $0.98A_0$ соответственно, где A_0 – амплитуда сейсмоакустической волны.

По результатам эксперимента были получены кривые (табл. 1), описывающие уровень гидроакустического сигнала от поверхности до дна в точках с глубиной H , удалением от излучателя на расстояние S и средней амплитудой сигнала A .

Таблица 1. Экспериментальные данные

№	H, м	S, м	Уравнение кривой	A, нм
1	37	335	$S_{37}(z) = (3.2835124 \times 10^{-7}) \times z^7 - (4.5340116 \times 10^{-5}) \times z^6 + 0.0024484 \times z^5 - 0.0643262 \times z^4 + 0.8225148 \times z^3 - 4.5942522 \times z^2 + 21.798353 \times z - 4.9269574$	14.6
2	37.5	502	$S_{37.5}(z) = (8.8507925 \times 10^{-5}) \times z^4 - 0.0085366 \times z^3 + 0.1861208 \times z^2 + 6.2774712 \times z + 2.4975244$	16.4
3	36.2	674	$S_{36.2}(z) = -(1.1161644 \times 10^{-4}) \times z^4 + 0.0063251 \times z^3 - 0.0895405 \times z^2 + 5.0292998 \times z - 0.206082$	28.7
4	30	970	$S_{30}(z) = (1.2446708 \times 10^{-4}) \times z^4 - 0.0112489 \times z^3 + 0.2185657 \times z^2 + 3.8794756 \times z + 0.9499853$	26.7
5	20	1148	$S_{20}(x) = (1.641604 \times 10^{-4}) \times z^4 - 0.0135414 \times z^3 + 0.2436404 \times z^2 + 1.2073308 \times z + 1.462406$	28.1
6	10	1252	$S_{10}(z) = 0.0561111 \times z^2 - 0.9616667 \times z + 6.2055556$	24.4
7	5	1300	$S_5(z) = 1.075 \times z^2 - 6.725 \times z + 10.85$	23.3

При модельных расчетах плотности энергии распространяющихся гидроакустических волн [1, 4], считается, что излученный низкочастотным гидроакустическим излучателем сигнал доходит до лазерного деформографа в виде волн поверхностного типа. При этом основной вклад в смещения земной коры вносят затухающие поверхностные волны рэлеевского типа. Амплитуда данных волн экспоненциально затухает с глубиной земной коры. В результате получены доли плотности гидроакустической энергии на каждой станции приема от плотности энергии излучателя с учетом цилиндрической расходимости излученного сигнала, а также доли плотности гидроакустической энергии, перешедшей на каждой станции приема в плотность сейсмоакустической энергии с учетом цилиндрической расходимости волны рэлеевского типа.

Результаты модельных расчетов сильно преобладали над экспериментальными данными, это связано с тем, что модель не учитывает многие эффекты распространения гидроакустических волн в мелком море, а также не учитывает вклад затухающих и незатухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся по границе «вода–дно». Тем не менее, в значительной части станций приема модельные кривые были похожи на экспериментальные и отображали относительно правдоподобно распределение давления, создаваемого гидроакустическим излучателем на частоте 22 Гц, от поверхности до дна.

Также модельные расчеты проведены для изучения пространственного распределения гидроакустической энергии. Инструментом моделирования является метод спектральных элементов (SEM), который представляет собой метод конечных элементов высокого порядка, разработанный для местных и глобальных масштабов распространения сейсмических волн [5]. Моделирование распространения акустического сигнала на шельфе убывающей глубины выполнено с помощью программного пакета SEM с открытым исходным кодом SPECFEM2D [6].

В результате расчетов получена картина пространственного распределения гидроакустической энергии от точки излучения до берега вдоль станций приема, приведенная на рис. 1.

Рис. 1.

При сравнении результатов проведенных экспериментальных и модельных исследований выявлены общие закономерности распространения низкочастотных гидроакустических волн на шельфе убывающей глубины и их трансформации в сейсмоакустические волны поверхностного типа на границе «вода–дно». Установлено, что при глубинах моря больше половины гидроакустической волны на 9–10%, около 4–7% энергии гидроакустических волн трансформируется в сейсмоакустическую энергию волн рэлеевского типа. При уменьшении глубины процентная доля трансформированной энергии резко возрастает. При глубинах, равных или меньше третьей части гидроакустической волны вся гидроакустическая энергия трансформируется в сейсмоакустическую энергию, то есть шельф на этих глубинах становится «непрозрачным» для гидроакустических волн соответствующих частот. Возможно при понижении частоты излучаемого гидроакустического сигнала этот эффект будет проявляться на больших глубинах. Небольшое количество станций не позволило более точно определить критические глубины, при которых шельф «запирает» прохождение гидроакустической энергии в воде, но ожидается, что эти критические глубины близки к глубинам, равным половине длины гидроакустической волны.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке темы АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Литература

1. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G. et al. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // J. Acoust. Soc. Am. 142 (4). October, 2017. P. 1990–1996.
2. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19–26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137–141.
3. Долгих Г.И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в журнал технической физики. 2011. Т. 37. № 3. С. 204–206.
4. Dolgikh G.I., Chupin V.A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave // Acoust. Phys. 2005. Vol. 51 (5). P. 538–542.
5. Lee S.J., Chen H.W., Liu Q., et al. Three-dimensional simulations of seismic wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method // Bull. Seism. Soc. Am. 2008. Vol. 98 (1). P. 253–264. DOI: 10.1785/0120070033.
6. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology // Commun. Comput. Phys. 2008. Vol. 3. P. 1–32.

**G.I. Dolgikh, S. Piao, S.S. Budrin, Y. Song, S.G. Dolgikh,
V.V. Ovcharenko, V.A. Chupin, S.V. Yakovenko, Y. Dong, X. Wang**

**STUDY OF LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC WAVES
BEHAVIOR AT THE SHELF OF DECREASING DEPTH AND
THEIR TRANSFORMATION ON THE “WATER-EARTH CRUST”
BOUNDARY**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
Baltiysk ayast., 43, Vladivostok, Russia, 690041,
Tel.: 8(423) 231-23-52, E-mail: chupin@poi.dvo.ru
Harbin engineering university, Acoustic science and technology laboratory*

The results of experimental and model studies of regularities of low-frequency hydroacoustic signals propagation at 22 Hz in the shelf area with decreasing depth and its transformation into seismic acoustic signals are presented.

Keywords: Hydroacoustic waves, hydroacoustic transmitter, laser strainmeter, model, transformation, seismoacoustic waves

Acknowledgment: The work was carried out with partial financial support of the AAAA-A20-120021990003-3 topic “Study of the fundamental foundations of the emergence, development, transformation and interaction of hydroacoustic, hydrophysical and geophysical fields of the World Ocean.”

References

1. Dolgikh G.I., Budrin S.S., and Dolgikh S.G. et al. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth. J. Acoust. Soc. Am., 142 (4), October, 2017, pp. 1990–1996, <https://doi.org/10.1121/1.5006904>.
2. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., and Pivovarov A.A. et al. A Hydroacoustic System that Radiates at Frequencies of 19–26 Hz. Instruments and Experimental Techniques. 2017, No. 4, pp. 596–600, doi: 10.1134/S0020441217030186.
3. Dolgikh G.I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. Technical Physics Letters, 2011, Vol. 37, No. 3, pp. 204–206.
4. Dolgikh G.I. and Chupin V.A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave. Acoust. Phys., 2005, Vol. 51 (5), pp. 538–542.
5. Lee S.J., Chen H.W., and Liu Q. et al. Three-dimensional simulations of seismic wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method. Bull. Seism. Soc. Am., 2008, Vol. 98 (1), pp. 253–264, doi: 10.1785/0120070033.
6. Tromp J., Komatitsch D., and Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology. Commun. Comput. Phys., 2008, Vol. 3, pp. 1–32.