

УДК 551.463.28

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ШЕЛЬФЕ УБЫВАЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ

© 2020 г. Академик РАН Г. И. Долгих^{1,*}, Piao Shengchun², С. С. Будрин¹, Song Yang², С. Г. Долгих¹, В. В. Овчаренко¹, В. А. Чупин¹, С. В. Яковенко¹, Dong Yang², Wang Xiaohan², В. А. Швец¹

Поступило 12.02.2020 г.

После доработки 15.02.2020 г.

Принято к публикации 16.02.2020 г.

При анализе экспериментальных данных и модельных расчетов изучены особенности распространения гидроакустических сигналов на шельфе убывающей глубины, создаваемых низкочастотным гидроакустическим излучателем на частоте 22 Гц, и трансформации их на границе “вода–дно” в рэлеевские волны, регистрируемые береговым лазерным деформографом. Приведены энергетические оценки распространяющихся гидроакустических сигналов в различных точках шельфа, а трансформированных сейсмоакустических сигналов – в земной коре зоны расположения лазерного деформографа.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, лазерный деформограф, гидроакустический сигнал, волны рэлеевского типа, трансформация, плотность энергии

DOI: 10.31857/S2686739720040039

В последние годы бурно развиваются различные методы, направленные на эффективное изучение Арктики с их последующим применением в прикладных исследованиях. Учитывая непростые погодные условия и сложную ледовую обстановку, некоторые методы ориентированы на разработку новых принципов изучения арктических объектов. Так, применение низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых приемных сейсмоакустических систем, например, лазерных деформографов, позволяет исследовать структуру и строение морской земной коры арктических морей [1]. В работе [1] и в последующих работах этого направления [2, 3] описаны особенности применения низкочастотных гидроакустических излучателей, генерирующих сложные фазоманипулированные сигналы, для изучения структуры и состава морской земной коры на трассах “излучение–берег” с построением модели верхнего слоя морской земной коры, в том числе для акваторий, покрытых льдом без его разрушения. С целью эффективного использования

низкочастотных гидроакустических излучателей для решения вышеописанных задач необходимо изучить условия их применимости, т.е. способности “просвечивать” верхний слой морской земной коры на трассе “излучатель–берег”. Как показано в приведенных работах, береговыми приемными системами регистрируются поверхностные волны, распространяющиеся по границам слоев. Учитывая это, можно ожидать, что низкочастотные гидроакустические излучатели будут эффективно работать в условиях, когда излученные ими сигналы трансформируются в поверхностные волны и распространяются по слоистой структуре дна. Как показано в работах [4, 5] для низкочастотного гидроакустического излучателя, генерирующего сигналы на частоте 33 Гц, такая трансформация наиболее эффективна при глубинах моря, равных или меньше половины длины волны излученного гидроакустического сигнала, т.е. равной около 23 м. Понятно, что для морей с большими глубинами необходимо применение гидроакустических излучателей с меньшими частотами, а для увеличения дистанции – более мощными. С этой целью был разработан и изготовлен мощный низкочастотный гидроакустический излучатель, работающий в частотном диапазоне 19–26 Гц [6]. Целью исследований, результаты которых приведены в данном сообщении, является изучение особенностей распространения и трансформации гидроакустических сигналов, генерируемых низкоча-

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, P.R. China

*E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

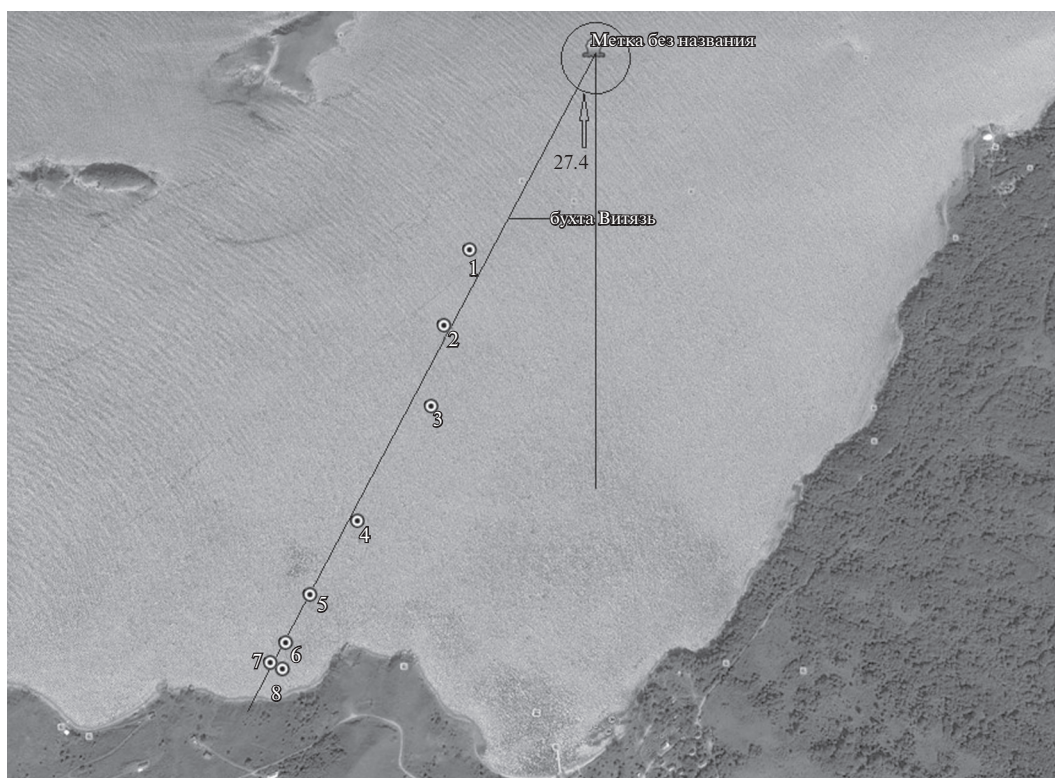


Рис. 1. Карта-схема эксперимента. Метка без названия – расположение судна с излучателем. 1–8 – номера станций приема. 27.4° – угол между трассой приема и направлением “север–юг”.

стотным гидроакустическим излучателем в диапазоне частот 19–26 Гц, на шельфе убывающей глубины.

Эксперимент проводился в бухте Витязь Японского моря. Карта-схема эксперимента приведена на рис. 1. В точке “Метка без названия” (координаты $42^\circ 35.6827'$ с.ш., $131^\circ 09.8707'$ в.д.) при глубине моря 32 м на якорю стояло научно-исследовательское судно, с борта которого на глубину 18 м был опущен низкочастотный гидроакустический излучатель [6], создающий в воде низкочастотные гармонические сигналы на частоте 22 Гц. Излученный гидроакустический сигнал регистрировался гидрофоном 8104 компании “Vgel&Kjeag” в точках полигона № 1–№ 7 (см. рис. 1). В каждой точке приема от поверхности до дна проводилась регистрация на горизонтах через 1 м. Низкочастотный гидроакустический излучатель создавал давление около 7 кПа при работе на станциях 3–7. А при работе на станциях 1–2 – около 5.8 кПа.

На каждой станции приема по полученным данным строилась кривая, описывающая уровень принятого гидроакустического сигнала, начиная от поверхности до дна. Затем для каждой кривой строилось полиномиальное уравнение наиболее подходящей степени. Одновременно проводилась регистрация сейсмоакустических сигналов,

полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов в сейсмоакустические сигналы на границе “вода–дно” береговым лазерным деформографом [7]. Полученные результаты приведены в табл. 1.

В дальнейшем по полученным экспериментальным данным в каждой точке приема была подсчитана плотность гидроакустической энергии. По данным лазерного деформографа была подсчитана плотность сейсмоакустической энергии по формуле для волны рэлеевского типа, беря во внимание то, что гидроакустическая энергия при движении по шельфу убывающей глубины переходит, в основном, в поверхностные волны рэлеевского типа, распространяющиеся по границам разделов “вода–дно” и “земная кора–воздух” [5, 8, 9]. Результаты расчетов приведены в табл. 2. При расчетах мы учли, что при скорости 2300 м/с, взятой в соответствии с [5], и согласно амплитудно-частотной характеристики лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м [10], амплитуда на записи лазерного деформографа равна удвоенной амплитуде сейсмоакустической волны на частоте 22 Гц. Расстояние от точки излучения до ближайшей точки расположения лазерного деформографа составляет 1780 м. В табл. 2 также приведены расчетные данные доли плотности гидроакустической энергии на каждой станции

Таблица 1. Экспериментальные данные

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

Таблица 2. Результаты расчета

Расстояние от точки излучения, м	Плотность энергии излучателя	Плотность гидроакустической энергии	Гидроакустика/Излучатель, %	Плотность сейсмоакустической энергии	Сейсмоакустика/гидроакустика, %
335	0.124	$3.1 \cdot 10^{-4}$	83.8	$0.76 \cdot 10^{-8}$	3.4
502	0.124	$1.7 \cdot 10^{-4}$	68.8	$0.89 \cdot 10^{-8}$	6.6
674	0.176	$8.3 \cdot 10^{-5}$	31.8	$3.98 \cdot 10^{-8}$	52.0
970	0.176	$4.0 \cdot 10^{-5}$	22.1	$3.03 \cdot 10^{-8}$	60.6
1148	0.176	$3.3 \cdot 10^{-6}$	2.2	$4.22 \cdot 10^{-8}$	100
1252	0.176	$1.9 \cdot 10^{-8}$	1.4	$3.03 \cdot 10^{-8}$	100
1300	0.176	$4.3 \cdot 10^{-9}$	0.3	$2.88 \cdot 10^{-8}$	100

приема от плотности энергии излучателя с учетом цилиндрической расходимости, а также доли плотности гидроакустической энергии, перешедшей на каждой станции приема в плотность сейсмоакустической энергии с учетом цилиндрической расходимости волны рэлеевского типа.

С целью изучения пространственного распределения гидроакустической энергии в воде были проведены модельные расчеты. Инструментом моделирования является метод спектральных элементов (SEM), который представляет собой метод конечных элементов высокого порядка, разработанный для местных и глобальных масштабов распространения сейсмических волн [11]. Мы моделировали распространение акустического сигнала на шельфе убывающей глубины с помощью программного пакета SEM с открытым исходным кодом SPECFEM2D [12, 13].

SPECFEM2D интегрирует упрощенную форму волнового уравнения (1–3) с помощью интер-

поляционного многочлена Лагранжа высокой степени. В пространственно-неоднородной области жидкости волновое уравнение для давления $P(x, t)$ имеет вид

$$\frac{1}{k} \ddot{P} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho} \right), \quad (1)$$

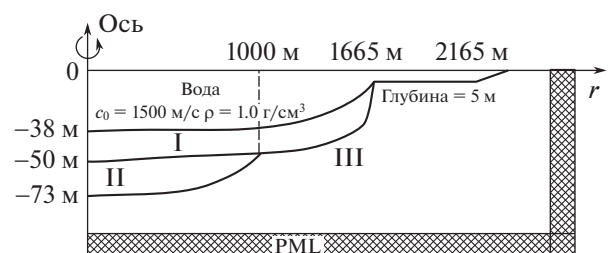


Рис. 2. Параметры моделирования.

Таблица 3. Параметры среды, используемые для моделирования

Слой	c_p	c_s	ρ
I – поздний плейстоценовый голоцен	1700 м/с	1000 м/с	1.5 г/см ³
II – гелазский средний плейстоцен	1800 м/с	1100 м/с	1.7 г/см ³
III – гранит	3700 м/с	2000 м/с	2.4 г/см ³

где $k(x)$ адиабатический объемный модуль упругости жидкости.

В линейно-упругих телах тензор деформации $\epsilon(x, t)$ вычисляется по вектору смещения u как

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T). \quad (2)$$

Тензор напряжений может быть выражен через тензор деформаций $\bar{\sigma}(\bar{x}, t)$ по закону Гука

$$\bar{\sigma} = \bar{c} : \epsilon, \quad (3)$$

где двоеточие обозначает операцию сокращения двойного тензора. Упругие свойства среды описываются тензором упругости четвертого порядка.

SPECFEM2D позволяет пользователям выполнять 2D- и 2.5D-(осесимметричное) моделирование распространения акустических, упругих, вязкоупругих и пороупругих акустических волн. Кроме того, SEM сочетает гибкость метода конечных элементов с точностью спектрального метода. Поэтому это хорошая программа для выполнения численного моделирования в акустике океана со сложными средами и топографией.

Модель представлена на рис. 2, поверхность океана установлена на $z = 0$ м. Все физические параметры среды указаны в табл. 3. Расчетная область имеет ширину 3000 м и глубину 100 м ниже поверхности моря. Все стороны, кроме верха и оси, покрыты идеально поглощающими слоями (PML) [14]. Источник импульсов давления Рик-

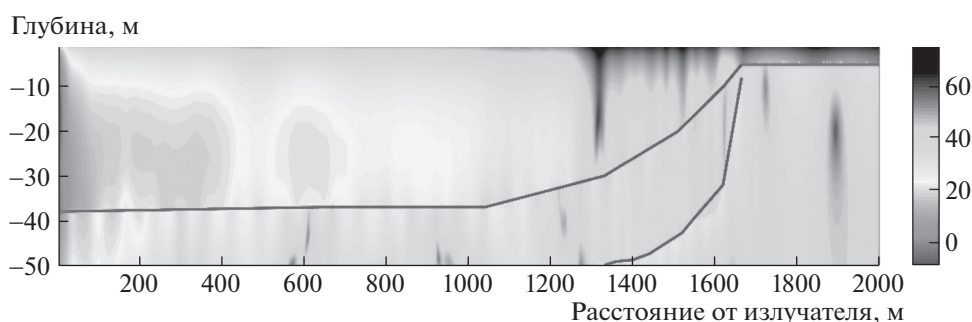
кера с доминирующей частотой 22 Гц расположен в $(rs, zs) = (0, -18$ м). Чтобы гарантировать качество сетки на шельфе с убывающей глубиной, мы оставляем глубину постоянной и равной 5 м после береговой линии. Сетка модели состоит из 118 385 спектральных элементов, построенных с помощью программного обеспечения с открытым кодом Gmsh [15]. Данная модель рассчитывалась в течение часа на ПК с операционной системой Linux.

В результате выполненных модельных расчетов получена картина пространственного распределения гидроакустической энергии от точки излучения, приведенная на рис. 3.

Модельные расчеты дают везде существенно завышенные значения плотности гидроакустической энергии в точках приема, хотя визуально кривые распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц от поверхности до дна удовлетворительно согласуются с экспериментальными кривыми распределения гидроакустического давления на этой же частоте, кроме станций 6 и 7. Экспериментальные кривые распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц от поверхности до дна на станциях приема 6 и 7 приведены на рис. 4.

Судя по верхней части рисунка и наклону кривой вправо, а не влево (как дают модельные расчеты), этот вклад вносит в измерения незатухающая волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы “вода–дно”, величина создаваемого давления которой равна около 4–5 Па, что также согласуется с расчетными данными, приведенными в табл. 2 для этих станций в столбце “Гидроакустика/Излучатель, %” и с выводами работы [4]. Модель не учитывает присутствие незатухающей волны рэлеевского типа.

Кроме того, анализируя результаты расчетов, приведенных в табл. 2, можно утверждать, что при глубинах моря, сравнимых с половиной длины гидроакустической волны, равной около 34.1 м, существенная доля гидроакустической энергии трансформируется в сейсмоакустическую энер-

**Рис. 3.** Пространственное распределение гидроакустической энергии от излучателя до берега вдоль станций приема.

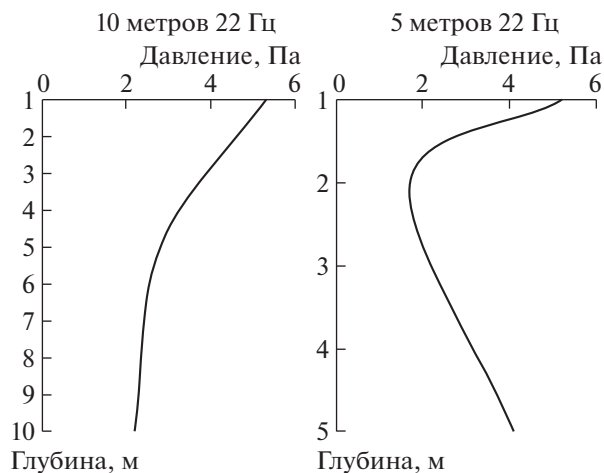


Рис. 4. Кривые распределения плотности гидроакустической энергии от поверхности до дна на станциях приема 6 (слева) и 7 (справа).

гию. А при значительно меньших глубинах наблюдается полная трансформация. То есть, присутствуют критические глубины при которых гидроакустическая энергия не распространяется в водном слое, а полностью трансформируется в сейсмоакустическую энергию.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (18–05–80011, опасные явления), программы Президиума РАН и темы “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане”.

FEATURES OF DISTRIBUTION AND TRANSFORMATION OF LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC SIGNALS ON THE SHELF OF THE DECREASING DEPTH

Academician of the RAS G. I. Dolgikh^{a, #}, Piao Shengchun^b, S. S. Budrin^a, Song Yang^b, S. G. Dolgikh^a, V. V. Ovcharenko^a, V. A. Chupin^b, S. V. Yakovenko^a, Dong Yang^b, Wang Xiaohan^b, and V. A. Shvets^a

^a Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

^b Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, P.R. China

[#]E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

In the analysis of experimental data and model calculations features of distribution of the hydroacoustic signals on the shelf of the decreasing depth created by a low-frequency hydroacoustic radiator at a frequency of 22 Hz and their transformations on boundary “water – a bottom” in the Rayleigh waves registered by a coastal laser strainmeter are studied. Energy estimates of distributing hydroacoustic signals at different points of the shelf and in the earth's crust in the location of the laser strainmeter are presented.

Keywords: hydroacoustic radiator, laser strainmeter, hydroacoustic signal, Rayleigh-type waves, transformation, energy density

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. // ДАН. 2013. Т. 452. № 3. С. 321–325. <https://doi.org/10.7868/S0869565213280165>
2. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г. и др. // ДАН. 2017. Т. 475. № 2. С. 210–214. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17070121>
3. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г. и др. // Инженерная физика. 2019. № 4. С. 38–61. <https://doi.org/10.25791/infizik.04.2019.612>
4. Долгих Г.И., Будрин С.С., Овчаренко В.В., Плотников А.А. // ДАН. 2016. Т. 470. №1. С. 95–98. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1609004X>
5. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., et al. // J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017. P. 1990–1996. <https://doi.org/10.1121/1.5006904>
6. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. // ПТЭ. 2017. № 4. С. 137–141. <https://doi.org/10.1134/S0020441217030186>
7. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
8. Долгих Г.И. // Акустический журнал. 1998. Т. 44. №3. С. 358–361.
9. Долгих Г.И., Чупин В.А. // Акустический журнал. 2005. Т. 51. № 5. С. 628–632.
10. Долгих Г.И. // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37. Вып. 5. С. 24–30.
11. Lee S. J., Chen H. W., Liu Q., et al. // Bull. Seism. Soc. Am. 2008. V. 98(1). P. 253–264. <https://doi.org/10.1785/0120070033>
12. Komatitsch D. and Tromp J. // Geophys. J. Int. 1999. V. 139. P. 806–822.
13. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. // Commun. Comput. Phys. 2008. V. 3. P. 1–32.
14. Xie Z., Matzen R., Cristini P., et al. // J. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 140(1). PP. 165–175.
15. Geuzaine C. and Remacle J.-F. // Int. J. Numer. Meth. Eng. 2009. V. 79(11). P. 1309–1331.