

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обжиров А.И. Казанский Б.А., Мельниченко Ю.И. Эффект звуко рассеивания придонной воды в краевых частях Охотского моря // Тихоокеанская геология. 1989. №2. С. 119–121
2. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
3. Обжиров А.И., Соснин В.А., Салюк А.Н. и др. Мониторинг метана в Охотском море. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
4. Obzhirov A., Shakirov R., Salyuk A., Suess E., Biebow N., Salomatin A. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea // Geo-Marine Letters. 2004. Vol. 24, N. 3. P. 135–139.
5. Газогидроакустический комплекс для оценки сейсмоструктурной активности: Пат. 78333 С1 Российская Федерация / А.И. Обжиров, А.С. Саломатин, В.И. Юсупов. № 3.2008126617; заявл. 30.06.2008; опубл. 2008.11.20, Бюл. № 32.
6. Технологический комплекс для разработки газогидратных залежей в открытом море: Пат.2386015 С1 Российская Федерация / А.И. Обжиров, А.А. Тагильцев. № 3.2008149316; заявл. 15.12.2008; опубл. 2010.04.10, Бюл. № 10.
7. Способ прогноза залежей углеводородов: Пат.2359290 С1 Российская Федерация / А.И. Обжиров. № 3.2007143249; заявл. 15.11.2007; опубл. 2009.06.20, Бюл. № 17.
8. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2009. R/V "Akademik M.A. Lavrentyev". Cruise 47 / Shoji H., Jin Y.K., Obzhirov A., Varanov B. 2010. 123 ps.
9. Хабакинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М: Научный мир, 2010. 276 с.
10. Газогеофизический комплекс для обнаружения подводных выходов газогидратов: Пат. № 70377 У1 Российская Федерация / В.И. Юсупов, А.С. Саломатин, А.И. Обжиров. № 2007135497; заявл. 24.09.2007; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2.

УДК 629.127.4

## ОЦЕНКА ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СПЕЦИФИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА ДНА МЕЛКОГО МОРЯ ПУТЕМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

**Н.Л. Халаев,  
П.А. Стародубцев,  
А.П. Шевченко**

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова<sup>1</sup>

Актуальность темы научной статьи определяется необходимостью теоретического и экспериментального обоснования наиболее рационального размещения стационарных средств акустического мониторинга водной среды в местах добычи морепродуктов, разработок шельфовой зоны, базирования кораблей и судов Министерства обороны и Министерства транспорта РФ.

Цель работы заключалась в анализе возможностей применения метода Кирхгофа–Гельмгольца для оценки фокусирующих свойств отдельных районов шельфовой зоны мелкого моря путем проведения измерений величины сигнала в ближней зоне. Материал статьи составлен по результатам научно-исследовательских работ, выполненных в лабораторных и натуральных условиях профессорско-преподавательским составом кафедры физики и общетехнических дисциплин ТОВВМУ им. С.О. Макарова в северо-восточной части залива Петра Великого (Японское море) в 2013 г.

Полученные результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования метода Кирхгофа–Гельмгольца для оценки фокусирующих свойств рельефа дна мелкого моря со специфическим рельефом и выбора мест установки стационарных средств гидроакустического мониторинга.

### ВВЕДЕНИЕ

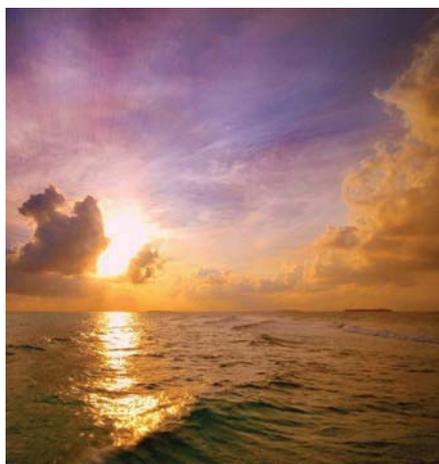
Существенное изменение геополитических и военных интересов иностранных государств к экономической зоне Российской Федерации требует от ее силовых структур наращивания системы освещения подводной обстановки, и в первую очередь – в шельфовой зоне.

Как показывает проведенный анализ, система контроля

подводной обстановки должна предусматривать развитие стационарных средств не просто наблюдения, а непрерывного измерения параметров среды, сравнения их с имеющимися базами данных и выработки решений по ее изменению или совершенствованию.

Постоянно действующая система мониторинга предполагает

<sup>1</sup> 690062, Владивосток, Камский пер., 6. Тел.: (423) 236-09-47. E-mail: vunc-vmf-tovmi@mil.ru



не только наличие стационарных систем наблюдения, но и в случае необходимости – их наращивание мобильными силами и средствами, включающими подводные, надводные, воздушные и космические [1].

Для обоснованного выбора мест установки стационарных систем мониторинга требуется большое количество оценок по целому ряду критериев. Влияние рельефа дна на формирование акустического поля в мелком море отмечено в целом ряде работ [1–3]. Одним из основных критериев в выборе мест установки стационарных средств наблюдения является критерий оценки «фокусирующих и/или рассеивающих свойств донного рельефа в месте постановки таких стационарных средств» [3].

Так как наибольшие проблемы в борьбе с шумами моря приходятся на шумы кораблей и судов, то в данной научной статье сделан основной упор на мониторинг частотного диапазона ближнего и дальнего судоходства [2]. С переходом в этот частотный диапазон становится понятно, что традиционные методики измерения, связанные с протяженными переходами судов – измерителей интенсивности сигнала в дальней зоне, становятся трудоемкими и экономически не выгодными. Это подтверждено рядом научных и научно-исследовательских работ [2–5]. В отдельных случаях (при исследовании акустического поля в низкочастотном диапазоне) измерения по существующим методикам стали невозможными. Указанные обстоятельства и создали потребность в иных теоретических и практических подходах к оценке фокусирующих и/или рассеивающих свойств контролируемой зоны.

### 1. Метод Кирхгофа–Гельмгольца

Смысл разработанного научно-исследовательской лабораторией *Federally Funded Research and Development Centers (FFRDCs)* (США) метода Кирхгофа–Гельмгольца (МКГ) показан на рис. 1.

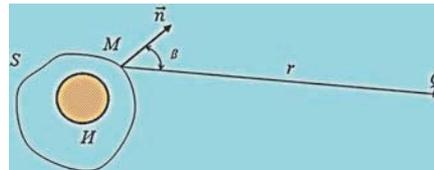


Рис. 1. Иллюстрация к выводу расчетной формулы

Если источник звука (*I*) находится внутри некоторой замкнутой поверхности *S*, то давление в любой точке пространства *Q*, лежащего вне поверхности *S*, можно принять равным *p(Q)* и определить поверхностным интегралом [4]:

$$p(Q) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[ p(M) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) - \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \frac{\partial p(M)}{\partial n} \right] dS, \quad (1)$$

где *p(M)* – комплексная амплитуда давления в точке *M*, лежащей на поверхности *S*; *n* – внешняя нормаль к поверхности *S* в точке *M*;  $\partial/\partial n$  – символ операции дифференцирования в направлении нормали; *r* – расстояние от *M* до *Q*;  $k = 2\pi f/c$  – волновое число; *f* – частота излучаемого сигнала; *c* – скорость звука в среде. Доказано, что уравнение (1) справедливо только для случая гармонического колебания.

Использование уравнения (1) предусматривает измерение амплитуды и фазы давления, а также градиента давления по всей поверхности *S*. Полное применение МКГ в предлагаемых вычислениях связано с несколькими допущениями. Первое допущение состоит в том, что в точку *M* (см. рис. 1)

приходят почти «плоские волны», то есть

$$\frac{\partial p(M)}{\partial n} \approx jkp(M). \quad (2)$$

Один из разработчиков методики МКГ, К.В. Хортон, в своей работе [6] показал, что для цилиндрических волн выражение (2) справедливо, когда апертура исследуемого преобразователя превышает длину волны более чем в 5 раз. Из экспериментальных результатов, полученных авторами, подтверждается возможность использования этого приближения для решения данной задачи.

Второе допущение заключается в том, что расстояние *r* принимается очень большим, так как выражение (1) используется для расчета характеристики направленности (ХН) в дальней зоне. В этом случае возможно применение уравнения

$$\frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \approx \frac{jk}{r} e^{jkr} \frac{\partial r}{\partial n} = -j \frac{ke^{jkr}}{r} \cos\beta, \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол между нормалью и прямой, соединяющей точки *M* и *Q* (см. рис. 1).

Подставляя уравнения (2) и (3) в уравнение (1) и считая величину *r* постоянной, получаем оценочную формулу для методики МКГ:

$$p(Q) = -\frac{jk}{4\pi r} \iint_S (1 + \cos\beta) e^{jkr} p(M) dS. \quad (4)$$

При использовании выражения (4), в случае конкретного оценочного или градуировочного измерения *p(Q)*, величины *r* и *k* должны быть постоянными, амплитуда и фаза звукового давления *p(M)* должны измеряться в дискретных точках на поверхности *S*, расположенных достаточно близко друг от друга,  $\beta$  рассчитываться для каждой точки *M* из геометрических соображений. Другими словами, при определении характеристики

направленности  $p(Q)$  она рассчитывается для последовательности точек, лежащих на дуге окружности, в центре которой размещен исследуемый преобразователь.

В развитие научных исследований К.В. Хортон, Д.Д. Бейкер [7] проводил эксперименты с большим цилиндрическим преобразователем, размещенным в бассейне, превосходящем диаметр преобразователя менее чем в 3 раза, и пришел к выводу, что вычисление по (4) позволяет определять в абсолютных единицах создаваемое в дальней зоне акустического поля звуковое давление и устанавливать значения уровня излучателя или его чувствительность, а в относительных единицах (децибелах) получить характеристику направленности.

Объединяя все вышеизложенное, необходимо отметить, что методика МКГ обладает и другими приближениями, полученными авторами на контрольных измерениях. Они заключаются в следующем:

- во-первых, элементы исследуемой антенны, отстоящие друг от друга на расстоянии, равном или меньшим  $0,8 \lambda$ , аппроксимируются сплошной плоскостью;

- во-вторых, контрольный зонд должен находиться на расстоянии  $1,25 \lambda$  длины волны от поверхности исследуемого преобразователя или апертуры антенны.

## 2. Оценка фокусирующих свойств специфического рельефа дна мелкого моря

Используя методику, обоснованную в МКГ, авторы статьи произвели оценку фокусирующих свойств акватории мелкого моря, а точнее, северо-восточной части залива Петра Великого (Японское море) (рис. 2). Работа состояла из четырех этапов:

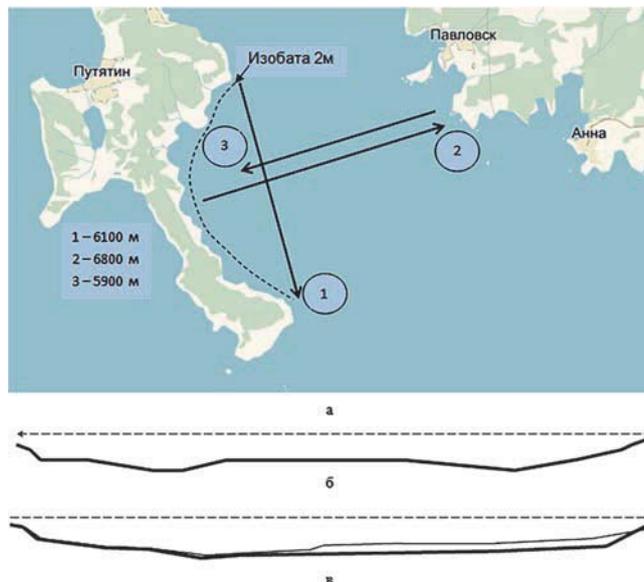


Рис. 2. Район натуральных измерений (пояснения в тексте)

1. Батиметрия дна района натуральных измерений и моделирование полученных результатов.

2. Измерения уровня акустического сигнала в указанном районе.

3. Расчет характеристик направленности района в модельных и реальных условиях.

4. Оценка фокусирующих свойств выделенного района залива Стрелок.

### 2.1. Батиметрия дна района натуральных измерений и моделирование полученных результатов

Перед началом измерений было определено, что проверке подлежит частотный диапазон шумов судоходства (10–800 Гц) [2]. Выбрана средняя скорость звука в водной среде 1500 м/с. Минимальная длина волны ( $\lambda$ ) составила (1,9–2,0) м. По навигационным картам района выбрана 2-метровая изобата, ограничивающая распространение шумов данного диапазона в сторону берега (рис. 2). Определено, что в рельефе дна имеет место перепад глубин с разницей до 10 м.

Для корректуры данных по рельефу дна с приведением его на день измерений сделаны кон-

трольные промеры по трем маршрутам (см. рис. 2, а). Батиметрические исследования проводились гидрографическим катером с использованием бортового навигационного эхолота типа НЭЛ-5 с непрерывной фиксацией данных на бортовом самописце.

Расстояния, пройденные гидрографическим катером, показаны на рис. 2, а. По результатам записи составлены профили дна по маршрутам измерений (рис. 2, б и 2, в).

По полученным данным составлена пространственная модель (рис. 3) в форме усеченного параболоида с фокусом, вынесенным за апертуру  $AB$  на расстояние ( $a_2$ ) – 90 м. Глубина усеченного параболоида ( $a_1$ ) – 3090 м.

В целях минимизации реверберационных помех приемник излучений установлен на глубине ( $h_2$ ) 17 м при глубине места в фокусе

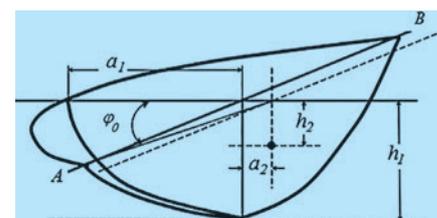


Рис. 3. Модель фокусирующего пространства и размещение в ней приемного гидрофона

( $h_1$ ) 34 м. В качестве излучателя использован поршневой титанат-бариевый излучатель, погруженный на максимальную длину имеющегося кабеля (15 м).

**2.2. Измерения уровня акустического сигнала в указанном районе**

Базовый принцип использования МКГ при исследовании акватории основывается на том, что излучатель в среде передвигается так, как будто измерительный гидрофон перемещается вдоль поверхности излучающего преобразователя, что допустимо исходя из принципа суперпозиции.

В [4] отмечено, что такие измерения возможны, если выполняется ряд условий:

- контрольный гидрофон движется вдоль апертуры района со специфическим рельефом (РСР) на расстоянии не ближе  $1,25\lambda$ ;
- максимальное удаление гидрофона от апертуры РСР определяется возможностями района;
- величины  $\beta$  и  $r$  в выражении (4) определяются соотношением  $r = r_{\max} \cos\beta$ , где  $r_{\max} = AB^2/\lambda$ , отложенным вдоль нормали  $\vec{n}$ , как следует из рис. 1;
- источник колебаний работает в режиме одиночного импульса, захватывающего не менее 10 периодов колебаний, а период следования импульсов превышает

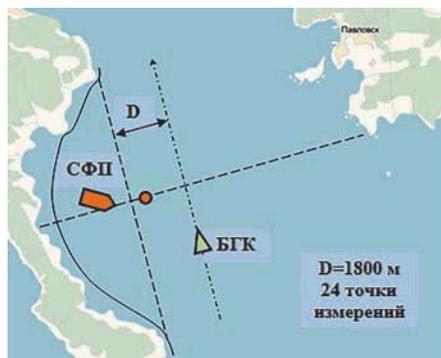


Рис. 4. Схема установки приемной базы СФП и генерального маршрута БГК с излучателем

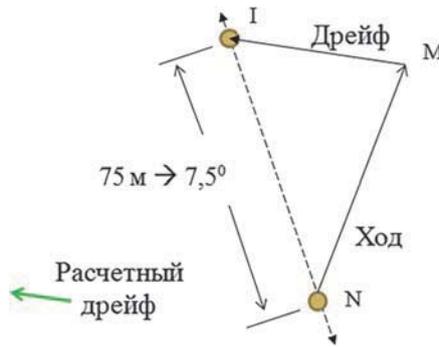


Рис. 5. Характер маневрирования гидрографического катера при измерениях

длительность восстановительных процессов.

Удаление от апертуры РСР выбрано 1800 м (рис. 4), а длина галса излучения определялась периодичностью излучений. Излучение гармонических колебаний проводилось через  $7,5^\circ$ , то есть через 75 м.

Для компенсации влияния течения ( $275^\circ$ , 0,5 м/с) было принято решение о движении катера с источником колебаний по схеме, указанной на рис. 5. Катер с поднятым на борт излучателем из точки N курсом хода переходит в точку M, ложится в дрейф, опускает излучатель на установленную глубину и производит одиночную посылку длительностью 10 мс из точки 1. Затем поднимает излучатель и повторяет всю операцию движения и излучения. Всего за время измерения было проведено 23 итерации.

**2.3. Расчет характеристики направленности РСР в модельных и реальных условиях**

РСР в сочетании с гидрофоном рассматриваются как конвертер акустических колебаний в колебания электрического тока в схеме обработки сигнала, работающий в режиме приема. По аналогии с зеркальными антеннами РСР характеризуется рядом параметров, интересующих нас при оценке его фокусирующих свойств. В данной

статье авторами рассматривается характеристика направленности РСР в плоскости поверхности воды (горизонтальной плоскости), которая считается основной характеристикой, дающей количественную оценку его фокусирующих свойств и позволяющей сделать вывод о свойствах данного района.

РСР приравнивается к раскрыву зеркальной антенны, формирующему отраженное от поверхности, образованной донным рельефом, акустическое поле, концентрирующееся в некоторой фокальной плоскости, в центр которой помещен приемный гидрофон. Гидрофон является ненаправленным приемником и на фокусирующие свойства РСР влияния не оказывает. Исходя из вышесказанного и опираясь на модель, изображенную на рис. 3, можно считать, что РСР представляет собой усеченный длиннофокусный параболоид вращения с углом раскрыва меньшим, чем  $\pi/2$ .

Фокусное расстояние РСР определится как сумма  $f_p = a_1 + a_2 = 3090 + 90 = 3180$  м, (5) где  $f_p$  – фокусное расстояние модели.

Угол раскрыва РСР определяется [8] выражением:

$$\frac{D_0}{2f} = \text{tg} \frac{\varphi_0}{2}, \quad (6)$$

где  $D_0 = AB/2$  – радиус зеркала модели РСР;  $\varphi_0$  – угол раскрыва апертуры РСР.

Путем преобразования выражения (6) получим:

$$\varphi_0 = 2 \cdot \text{arctg} \frac{D_0}{2f}. \quad (7)$$

Подставляя в него данные прямых измерений, получим угол раскрыва апертуры РСР:

$$\varphi_0 = 2 \cdot \text{arctg} \frac{3050}{2 \cdot 3180} = 2 \cdot 25,6^\circ = 51,2^\circ.$$

Уравнение характеристики направленности (ХН) в горизонтальной плоскости  $R_p(\varphi)$ :

$$R_p(\varphi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 2D_0}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{\pi \cdot 2D_0}{\lambda} \sin \varphi}. \quad (8)$$

Учитывая допущение о равномерном амплитудном распределении давления в раскрыве РСР, можно перейти к определению основных точек ХН с учетом уравнения (8).

Ширина характеристики направленности на уровне половинной мощности принимаемого гидрофоном сигнала ( $\varphi_{0,5}$ ) по основному направлению приема

$$\varphi_{0,5} = 2 \arcsin 0,45 \frac{\lambda}{2D_0} \quad (9)$$

и дополнительным направлениям приема

$$\varphi_{\max}^{(i)} = \arcsin \left[ \frac{\lambda}{2b} (2i + 1) \right],$$

$$\varphi_{\min}^{(i)} = \arcsin \left( \frac{\lambda}{2b} i \right). \quad (10)$$

Ширина характеристики направленности РСР по основному направлению по расчетам на модели составила величину  $\varphi_{0,5} = 29,9^\circ$ . Дополнительные максимумы и минимумы представлены на рис. 6.

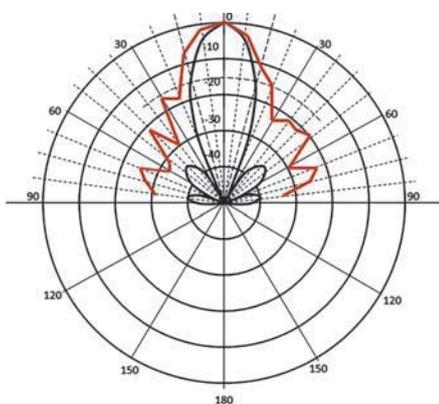


Рис. 6. Расчетная и измеренная характеристика направленности исследуемого района

Замеры акустического поля были пересчитаны в относительные величины и совмещены с расчетным графиком. Черным цветом на рис. 6 показана расчетная ХН РСР, красным цветом отмечены результаты измерений и расчетов по полученным данным звукового давления.

#### 2.4. Оценка фокусирующих свойств выделенного района залива Стрелок

Сравнения расчетных и измеренных величин показали:

- измеренное направление основного приема сигнала совпало с расчетным направлением;
- измеренный уровень сигнала основного направления более чем на 6 дБ превышает уровни сигналов, принятых по дополнительным направлениям;
- ширина основного направления на минимальном уровне превосходит расчетную величину на  $12^\circ$ ;
- уровни максимумов и минимумов дополнительных направлений приема на 15–20 дБ превышают расчетные;
- в измеренном поле наблюдается большее количество дополнительных направлений приема, чем в расчетном поле.

Морские исследования научно-исследовательских судов ДВО РАН, проведенные в Тихом океане, показали, что в северо-западной части целый ряд районов береговой черты имеет форму, схожую с таковой залива Стрелок [9]:

- полуостров Камчатка (заливы: Камчатский, Кроноцкий, Авачинский);
- Курильская гряда (острова: Парамушир, Онекотан, Кунашир);
- остров Сахалин (залив Терпения и залив Анива).

Выбранный РСР [10] северо-восточной части залива Петра Великого (Японское море) обладает свойствами фокусировки акустической энергии, поступающей в волновой канал со стороны открытого моря, поэтому может быть использован для размещения стационарного средства гидроакустического мониторинга среды с целью решения исследовательских и прикладных (практических) программ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из представленных экспериментальных результатов и модельных расчетов можно отметить следующее:

- разработанный научно-исследовательской лабораторией FFRDCs (США) метод Кирхгофа–Гельмгольца и использованный авторами статьи для оценки фокусирующих свойств северо-восточной части залива Петра Великого (Японское море) позволяет сделать оптимистические прогнозы на совершенствование существующей общей методологии оценки правильности выбора мест установки стационарных средств акустического мониторинга водной среды;
  - положительные результаты экспериментальных измерений фокусирующих свойств в исследуемом районе дают авторам надежду на продолжение исследований в данной области с целью подтверждения полученных данных.
- В случае признания российскими учеными подобных измерений типовыми и необходимыми требуется проведение ряда дополнительных натурных измерений в других морях экономической зоны Дальневосточного региона РФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Димидов В.Е. Некоторые концептуальные положения процесса мониторинга океанской среды. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. 224 с.
2. Бреховских Л.М. Акустика океана. М.: Наука, 1974. 694 с.
3. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / пер. С.Н. Карпачева. М.: Мир, 1990. 656 с.
4. Bobber R.J. Underwater electroacoustic measurements. Washington: USA Naval research laboratory, 1970.
5. Baker B.V., Copson E.T. The Mathematical Theory of Huygens Principle. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Clarendon Press, 1950. P. 20–38.
6. Horton C.W., Innis G.S., Jr. The Computation of Far-Field Radiation Patterns from Measurements Made Near the Source // J. Acoust. Soc. Am. 1961. Vol. 33, No 877. P. 90–165.
7. Baker D.D. Determination of Far-Field Characteristics of Large Underwater Sound Transducers from Near-Field Measurements // J. Acoust. Soc. Am. 1962. Vol. 34, No 1737. P. 16–34.
8. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике // Библиотека инженера-гидроакустика. Ленинград: Судостроение, 1988. 288 с.
9. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Халаев Н.Л. Создание и эксплуатация радиогидроакустических систем комплексного мониторинга гидрофизических полей морских акваторий на основе разработок средств морского приборостроения. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. 264 с.
10. Стародубцев П.А., Халаев Н.Л. Аттрактно-фрактальная технология дистанционного мониторинга закрытых бухт // Научные технологии. 2012. Т. 13, № 1. С. 36–41.

