

# МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

С.В. Жуменков, Г.В. Конюхов, А.И. Машошин, И.С. Пестерев

В работе описана методика оперативного измерения первичного гидроакустического поля (ПГП) подводных аппаратов (ПА) с использованием гидроакустического буя с направленной антенной и калиброванным приёмным трактом. Обоснованы условия, при выполнении которых точность измерений будет соответствовать заданным требованиям. Показано, что наибольшее влияние на точность измерений оказывает точность определения дистанции между ПА и буюм. Приведён алгоритм определения этой дистанции, основанный на использовании измеренных пеленгов ПА и известной скорости ПА. Изложена формализованная методика измерения ПГП ПА, включающая, в том числе, калибровку приёмного тракта буя. Приведены результаты апробации методики в условиях Ладожского озера путём измерения ПГП катера, многократно проходящего мимо гидроакустического буя с направленной антенной на скоростях 6 и 22 узла. Точность определения ПГП по результатам апробации составила 2–3 дБ, что соответствует точности измерений на специализированных стационарных полигонах.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, первичное гидроакустическое поле, гидроакустический буй, методика измерения первичного гидроакустического поля.

## Введение

Измерение первичного гидроакустического поля (ПГП) военных кораблей и подводных лодок осуществляется в интересах определения уровня их скрытности, а точнее, дистанции их обнаружения различными гидроакустическими средствами противника [1–3]. Целью измерения ПГП гражданских судов является определение их влияния на морскую флору и фауну, особенно учитывая, что в настоящее время в море одновременно находится несколько сотен тысяч судов и их количество неуклонно растёт. Кроме того, в результате измерения ПГП формируется экспериментальный материал, позволяющий учёным и инженерам выявлять наиболее шумные источники ПГП и проверять разработанные методы снижения уровней ПГП.

Для измерения ПГП в странах мира, являющихся лидерами в кораблестроении и судостроении, существуют специальные полигоны, которые подразделяются на стационарные и мобильные [2]. Стационарные полигоны представляют собой прибрежную инфраструктуру, позволяющую с высокой точностью

измерять различные физические поля (и в первую очередь гидроакустическое) подводных лодок, надводных кораблей и судов. Стационарные полигоны размещаются вблизи крупных кораблестроительных центров, а также военно-морских баз.

Мобильные гидроакустические полигоны представлены комплексом измерительных средств, размещаемых на специализированных судах измерения физических полей. Преимуществом мобильных полигонов является способность осуществлять измерение ПГП в различных районах Мирового океана, что позволяет экономить время и средства, которые потребовались бы для доставки объекта измерения на стационарный полигон. Для развёртывания мобильного полигона требуется, как правило, несколько суток.

Измерение ПГП морских объектов на специализированных гидроакустических полигонах осуществляется следующим образом. На объект временно устанавливается гидроакустический ответчик, позволяющий методом запрос–ответ определять текущее расстояние между объектом и ненаправленным гидрофоном с калиброванным приёмным трактом. Из-

мерение осуществляется в процессе прохода объекта мимо гидрофона. Минимальная дистанция между гидрофоном и объектом в процессе прохода не превышает нескольких десятков метров и определяется из условия достижения заданного отношения сигнал/помеха на входе гидрофона. При этом заглубливание гидрофона и глубина подводного объекта выбираются таким образом, чтобы на вход гидрофона поступали только прямые лучи шума объекта. До и после прохода объекта при помощи того же гидрофона измеряется узкополосный спектр шумов акватории. В процессе прохода объекта периодически измеряются узкополосные спектры смеси шума объекта и шумов акватории с привязкой ко времени и одновременно также с привязкой ко времени измеряется расстояние между объектом и гидрофоном. После завершения прохода определяется время, соответствующее минимальной дистанции между объектом и гидрофоном, сама эта дистанция и соответствующий ей измеренный спектр смеси шума объекта и шумов моря. Далее из спектра смеси вычитается спектр шумов акватории и результирующий спектр шума объекта путём деления на квадрат частотной зависимости коэффициента передачи приемного тракта гидрофона приводится ко входу гидрофона. Затем полученный спектр шума объекта путём умножения на квадрат минимального расстояния между гидрофоном и объектом приводится к расстоянию 1 м. С использованием полученного спектра путём суммирования соответствующих спектральных отсчётов вычисляются квадраты давления шума объекта в каждом стандартном 1/3-октавном фильтре. В завершение из них извлекается квадратный корень, результатом чего является набор давлений в 1/3-октавных фильтрах.

С началом интенсивного развития подводной робототехники стала ощущаться острая потребность в появлении измерительных полигонов в непосредственной близости от предприятий, на которых создаются средства подводной робототехники. Имеющиеся мобильные полигоны, в силу своей малочисленности, данную проблему решить не могут. Строительство новых судов измерения физических полей экономически не оправдано. В силу этого появилась необходимость в создании новых малогабаритных и недорогих средств измерения ППП.

Целью предлагаемой работы является описание результата обоснования методики измерения ППП подводного аппарата и её реализации с использованием гидроакустического буя с направленной гидроакустической антенной и калиброванным приёмным трактом.

## ■ Постановка задачи

Требуется измерить следующие характеристики ППП подводного аппарата (ПА):

- уровни шумоизлучения в стандартных 1/3-октавных фильтрах [4], приведённые к расстоянию 1 м от источника;
- уровни шумоизлучения в стандартных 1/3-октавных фильтрах, приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м от источника.

Уровни ППП в 1/3-октавных фильтрах должны быть измерены со среднеквадратической погрешностью (СКП) не более заданной (например, 3 дБ) для заданного набора скоростей ПА при его движении в подводном и надводном положении.

## ■ Обоснование методики определения ППП ПА

При обосновании методики необходимо принять во внимание два обстоятельства, связанных с особенностями ПА:

- прогнозируемая низкая шумность;
- нежелательность временной установки на ПА гидроакустического ответчика.

Учёт этих обстоятельств приводит к необходимости:

- использования для измерений направленного приёмника, имеющего более высокую помехоустойчивость по сравнению с ненаправленным гидрофоном;
- разработки метода определения расстояния между приёмником и ПА, не требующего оснащения ПА дополнительной аппаратурой.

При измерении ППП ПА должны быть выполнены следующие условия:

- ПА на заданной скорости в подводном либо надводном положении должен пройти мимо гидроакустического приёмника с направленным калиброванным приёмным трактом;
- в процессе прохода с точной привязкой ко времени должны осуществляться запись сигнала с выхода калиброванного приёмника и одновременно с необходимой точностью контролироваться расстояние между ПА и приёмником;
- гидроакустические условия в районе должны быть такими, чтобы при соответствующем выборе заглубливания приёмника, глубины погружения ПА и расстояния между ПА и приёмником сигнал от ПА до приёмника распро-

странялся только по водным лучам;

- отношение сигнал/помеха на входе приёмника на минимальном расстоянии между ПА и приёмником должно быть не менее 10 дБ.

Определение приведённых к 1 м уровней шумоизлучения в стандартных 1/3-октавных фильтрах осуществляется по формуле:

$$W_i = r \cdot \left[ \int_{f_{1/i}}^{f_{2/i}} \frac{S_{s+n}(f)}{\eta^2(f)} df - \int_{f_{1/i}}^{f_{2/i}} \frac{S_n(f)}{\eta^2(f)}(f) df \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где

$W_i$  – приведённый к 1 м уровень ПГП ПА в  $i$ -м 1/3-октавном фильтре, Па;

$f_{1/i}, f_{2/i}$  – нижняя и верхняя граничные частоты  $i$ -го 1/3-октавного фильтра, Гц [4];

$r$  – расстояние между ПА и приёмником, м;

$S_{s+n}(f)$  – узкополосный энергетический спектр смеси сигнала и помехи (шумов моря), измеренный на выходе приёмника при работе с ПА, В<sup>2</sup>;

$S_n(f)$  – энергетический спектр помехи, измеренный на выходе приёмника до либо после прохода ПА мимо приёмника, В<sup>2</sup>;

$\eta(f)$  – передаточная характеристика приёмного тракта, В/Па.

Оценим точность определения ПГП ПА. Можно показать [5], что относительная дисперсия оценки приведённого уровня ПГП ПА в  $i$ -м 1/3-октавном фильтре в соответствии с формулой (1) определяется в виде:

$$\frac{\sigma_{W_i}^2}{W_i^2} = \frac{\sigma_r^2}{r^2} + \frac{\sigma_{\eta}^2}{\eta^2} + \left[ \frac{(1+Q_i^{-1})^2 + Q_i^{-2}}{(f_{2/i} - f_{1/i}) \cdot T} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где

$W_i, \sigma_{W_i}$  – истинное значение приведённого уровня ПГП ПА в  $i$ -м 1/3-октавном фильтре и СКП его оценки соответственно, Па;

$r, \sigma_r$  – истинное значение расстояния между ПА и приёмником и СКП его оценки соответственно, м;

$\eta_i, \sigma_{\eta}$  – истинное значение передаточной характеристики приёмного тракта в  $i$ -м 1/3-октавном фильтре и СКП его оценки соответственно, В/Па;

$Q_i$  – отношение сигнал/помеха (ОСП) (по мощности) в  $i$ -м 1/3-октавном фильтре, вычисляемое по формуле

$$Q_i = \frac{\int_{f_{1/i}}^{f_{2/i}} S_{s+n}(f) df}{\int_{f_{1/i}}^{f_{2/i}} S_n(f) df} - 1, \quad (3)$$

$T$  – время накопления при измерении спектров  $S_{s+n}(f)$  и  $S_n(f)$ , с.

Для выполнения условия измерения уровней с СКП не более 3 дБ формула (2) преобразуется в неравенство

$$\frac{\sigma_r^2}{r^2} + \frac{\sigma_{\eta}^2}{\eta^2} + \left[ \frac{(1+Q_i^{-1})^2 + Q_i^{-2}}{(f_{2/i} - f_{1/i}) \cdot T} \right]^{0,5} < 2. \quad (4)$$

Поскольку калибровка приёмников, как правило, осуществляется с СКП 1 дБ, 2-й член в левой части неравенства (4) имеет величину 1,26. 3-й член в левой части неравенства (4) при  $Q > 10$  (10 дБ) много меньше единицы и им можно пренебречь. В результате получаем:

$$\frac{\sigma_r}{r} < 0,86. \quad (5)$$

Таким образом, для обеспечения заданной точности определения ПГП ПА СКП оценки расстояния между ПА и приёмником не должна превышать 0,86 от истинного расстояния между ПА и приёмником.

Теперь определим, на какой дистанции выполняется условие  $Q > 10$  (10 дБ).

Поскольку в звуковом диапазоне частот спектр шума моря и спектр шумоизлучения ПА имеют практически одинаковую форму с наклоном -6 дБ/октава, ОСП на входе калиброванного приёмника можно рассчитать по формуле:

$$Q(f) = P_s - P_n + \gamma(f) - 20 \cdot \lg r, \quad (6)$$

где

$Q(f)$  – ОСП в функции частоты, дБ;

$P_s$  – уровень шума ПА, приведённый к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м, дБ//20 мкПа;

$P_n$  – уровень шумов моря на входе приёмника, приведённый к частоте 1 кГц и полосе 1 Гц, дБ//20 мкПа;

$\gamma(f)$  – коэффициент концентрации приёмника в функции частоты, дБ (для ненаправленного гидрофона  $\gamma(f)=0$  дБ, для буя с направленной антенной  $\gamma(f)$  зависит от частоты и площади приёмной антенны).

Заметим, что, поскольку проход ПА мимо приёмника осуществляется на расстоянии не более нескольких десятков метров и шум ПА попадает на вход приёмника по водным лучам, в формулу (6) не включены

члены, учитывающие пространственное затухание и аномалию распространения сигнала.

Из формулы (6) следует, что для выполнения условия  $Q > 10$  дБ расстояние  $r$  должно удовлетворять условию

$$r < 10^{\frac{P_s - P_n + \gamma(f) - 10}{20}}. \quad (7)$$

Например, при шумности ПА 50 дБ, при приведённом уровне шумов моря 20 дБ (что соответствует волнению 1 балл) и при использовании ненаправленного приёмника минимальное расстояние между ПА и приёмником не должно превышать 10 м. При большей шумности АНПА, а также при использовании направленной антенны минимальная дистанция может быть увеличена.

Таким образом, для измерения ПГП ПА с заданными требованиями необходимо выполнение следующих условий:

- волнение моря не более 1 балла;
- минимальное расстояние между ПА и приёмником при проходе не должно превышать 10 м;
- шум ПА должен поступать на приёмник только по водным лучам;
- текущее расстояние между ПА и приёмником должно оцениваться с СКП не более 86% от истинного значения;
- передаточная характеристика приёмного тракта должна быть откалибрована с СКП не более 1 дБ.

Остановимся на методе определения текущей дистанции между ПА и приёмником с использованием гидроакустического буй с направленной акустической антенной. Рассмотрим сценарий измерения ПГП ПА. В некоторой точке моря установлен на якорь буй (рис. 1). Мимо него движется ПА с постоянным курсом и с известной постоянной скоростью  $V$ , измеряемой навигационными приборами ПА с СКП не более 0.5 м/с. В процессе движения ПА буй с периодом в несколько секунд измеряет пеленги ПА и запоминает их с привязкой ко времени.

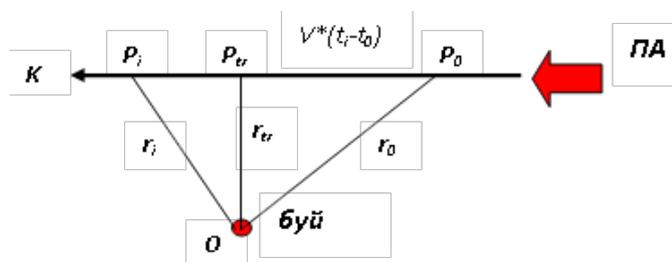


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма определения расстояния между ПА и буйем

Модель движения ПА (по теореме синусов из треугольника  $P_0OP_i$ ) имеет вид:

$$r_i = V \cdot (t_i - t_0) \cdot \frac{\sin(K - P_0)}{\sin(P_i - P_0)}, \quad (8)$$

где

$t_0$  – произвольный начальный момент времени;

$t_i$  – текущий момент времени;

$P_0, P_i$  – измеренные пеленги ПА, соответствующие моментам времени  $t_0$  и  $t_i$ ;

$r_i$  – расстояния между ПА и буйем в момент времени  $t_i$ ;

$V$  – скорость ПА.

$K$  – курс ПА, определяемый по данным курсоуказателя ПА либо вычисляемый по формуле

$$K = \arctg \frac{\sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_1) \cdot \sin(P_2) - \sin(P_2 - P_1) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \sin(P_0)}{\sin(P_1 - P_0) \cdot (t_2 - t_1) \cdot \cos(P_2) - \sin(P_2 - P_1) \cdot (t_1 - t_0) \cdot \cos(P_0)}, \quad (9)$$

где  $P_0, P_1, P_2$  – пеленга ПА, измеренные в начале ( $t_0$ ), середине ( $t_1$ ) и конце ( $t_2$ ) движения ПА с постоянными курсом и скоростью.

Формула (8) позволяет определить расстояние между ПА и буйем в произвольный момент времени. Кратчайшее расстояние между ПА и буйем соответствует пеленгу, перпендикулярному курсу ПА, и определяется по формуле

$$r_{\min} = r_i \cdot \sin(K - P_i), \quad (10)$$

где  $P_i$  и  $r_i$  – пеленг ПА и расстояние между ПА и буйем, соответствующие произвольному моменту времени  $t_i$ .

Точность определения расстояния между ПА и буйем зависит от точности измерения пеленгов ПА и разности пеленгов в моменты начала и окончания движения ПА с постоянными курсом и скоростью. Проведённое моделирование показало, что при определении курса ПА по формуле (9) и при СКП измерения пеленга  $2^\circ$ , характерной для буйа с направленной антенной, СКП определения расстояния между ПА и приёмником не превышает 20%, что согласуется с приведённым выше требованием.

## ■ Методика определения ПГП ПА

Для определения ПГП в области звуковых частот глубина района должна быть не менее 100 м. Для определения ПГП в области инфразвуковых частот глубина района должна быть пропорционально больше.

Определение ППП ПА осуществляется в следующем порядке.

#### А. Подготовка к измерениям

1. Измеряются вертикальное распределение скорости звука и приведённый к стандартным условиям уровень шумов акватории.

2. По формуле (7), исходя из ожидаемой шумности ПА и уровня шумов акватории, рассчитывается максимальное значение кратчайшего расстояния между ПА и буем  $r_{\max}$ .

3. Определяются глубина хода ПА  $H_{PA}$  и заглушение гидроакустической антенны буя  $H_{ant}$  исходя из двух условий:

- они должны быть не менее 5 м;
- в текущих гидроакустических условиях шум ПА должен поступать на антенну буя только по водным лучам. Для выполнения этого условия с использованием лучевой программы для разных значений  $H_{PA}$  и  $H_{ant}$ , превышающих 5 м, осуществляется расчёт лучевой структуры поля сигнала ПА на входе антенны буя, находящейся на расстоянии  $r_{\max}$  от буя. По результатам расчёта определяется пара значений  $H_{PA}$  и  $H_{ant}$ , соответствующая распространению шума ПА только по водным лучам.

4. В выбранной точке района моря на якорю устанавливается буй с направленной гидроакустической антенной, погруженной на глубину  $H_{ant}$ , и начинает с привязкой ко времени (синхронизированному перед постановкой) непрерывную запись шумов с выхода всех приёмников гидроакустической антенны.

#### Б. Проведение измерений

5. ПА погружается на глубину  $H_{PA}$  на расстоянии 50–100 м от буя и начинает движение с заданной скоростью  $V$  в направлении буя таким курсом, чтобы пройти мимо буя на расстоянии не более  $r_{\max}$ . В процессе движения курс и скорость ПА системой управления ПА поддерживаются постоянными. В памяти системы управления ПА фиксируется время начала и окончания движения, а также глубина, скорость и курс ПА.

6. В процессе движения ПА буй продолжает непрерывную запись шумов с выхода всех приёмников гидроакустической антенны.

7. Удалившись от буя на 50–100 м, ПА разворачивается и ещё 5–10 раз повторяет движение мимо буя на той же скорости.

8. Затем проходы повторяются на другой скорости.

9. После завершения всех заданных проходов из памяти ПА извлекаются привязанные ко времени за-

писи курса, скорости и глубины, а из памяти буя извлекаются привязанные ко времени записи шумов на выходе каждого приёмника.

#### В. Обработка записей

10. С использованием записей шумов, полученных до либо после движения ПА, вычисляется усреднённый по горизонту накопленный энергетический спектр шумов моря  $S_n(f)$  с разрешением 1 Гц;

11. С использованием записей шумов с выхода приёмников буя с интервалом в несколько секунд осуществляется формирование веера характеристик направленности антенны буя с определением текущего пеленга ПА. В результате этого строится и запоминается зависимость пеленга ПА от времени.

12. По записям, сделанным ПА, и характеру изменения пеленга определяются границы по времени каждого прохода ПА мимо буя с постоянными курсом и скоростью. Каждому проходу ставится в соответствие курс, скорость и глубина ПА.

13. Осуществляется обработка каждого прохода ПА, которая включает:

- по формуле (8) определяется зависимость расстояния между ПА и буем от времени;
- с использованием записей шумов, сделанных в бую, вычисляется пронумерованная последовательность  $j = 1, \dots, N$  энергетических спектров смеси сигнала и помехи  $S_{s+n/j}(f)$  с разрешением порядка 1 Гц, которые привязываются к текущей дистанции до ПА  $r_j$ . Каждый  $j$ -й энергетический спектр вычисляется с использованием сигнала на выходе характеристики направленности антенны буя, ориентированной по пеленгу на ПА  $P_j$ , соответствующему времени  $t_j$ ;
- для каждой  $i$ -й 1/3 октавы спектра  $S_{s+n/j}(f)$  по формуле (3) вычисляется ОСП  $Q_{j,i}$ ;
- для тех 1/3 октав, для которых  $Q_{j,i} > 10$ , по формуле (1) вычисляются уровни ППП в 1/3-октавных фильтрах  $W_{j,i}$ , приведённые к расстоянию 1 м;
- для тех же 1/3 октав вычисляются уровни ППП  $W_{j,i/111}$ , приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м:

$$W_{i,j/111} = W_{i,j} \cdot \sqrt{\frac{f_{1/i} \cdot f_{2/i}}{f_{2/i} - f_{1/i}}}; \quad (11)$$

- уровни  $W_{j,i}$  и  $W_{j,i/111}$ , соответствующие разным моментам времени и одноимённой 1/3 октаве, усредняются с весами, пропорциональными их ОСП  $Q_{j,i}$ :

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} Q_{i,j} \cdot W_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N_i} Q_{i,j}}$$

$$W_{i/111} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} Q_{i,j} \cdot W_{i,j/111}}{\sum_{j=1}^{N_i} Q_{i,j}}, \quad (12)$$

где  $N_i$  – количество интервалов времени, на которых для  $i$ -го 1/3-октавного фильтра выполнено условие  $Q_{j,i} > 10$ .

14. Уровни  $W_{j,i}$  и  $W_{j,i/111}$ , полученные при обработке проходов, на которых ПА двигался с одинаковыми скоростями, усредняются.

Следует заметить, что дополнительно можно оценить ПГП для разных курсовых углов (ракурсов наблюдения) ПА. Для этого измеренные спектры  $S_{s+n/j}(f)$  нужно сортировать в зависимости от курсового угла ПА на соответствие 4 интервалам курсовых углов – нос, корма, правый и левый борт – и далее всю описанную обработку выполнять для каждого интервала курсовых углов независимо.

Описанная методика может быть применена для измерения ПГП различных объектов, в том числе подводных лодок, надводных кораблей и судов.

Одним из условий измерения ПГП описанным способом является высокоточная калибровка приёмного тракта буя. Её можно выполнить непосредственно в процессе проведения измерений ПГП шумящего объекта, например, катера. Для этого в непосредственной близости от антенны буя нужно погрузить калиброванный гидрофон, записать сигнал с его выхода, а затем обработать его по той же методике с получением усреднённых уровней шума объекта в 1/3-октавных фильтрах, приведённых к 1 м,  $W_{i/gidr}$ .

С использованием этих уровней передаточная характеристика приёмного тракта буя определяется по формуле:

$$\eta_{i/new} = \eta_i \cdot \frac{W_{i/gidr}}{W_i}, \quad (13)$$

где

$\eta_i$  – коэффициенты передачи в 1/3-октавных фильтрах, при которых вычислялось приведение шума объекта к стандартным условиям по данным буя;

$\eta_{i/new}$  – откалиброванные коэффициенты передачи в 1/3-октавных фильтрах.

## ■ Апробация методики определения ПГП

Апробация методики проводилась в акватории Ладожского озера в мелководном районе с глубиной 15–20 м. Скорость звука монотонно возрастала с глубиной с предельно малым градиентом. Волнение в процессе работ составляло 1 балл.

Для проведения измерений использовался заякоренный буй с направленной гидроакустической антенной, которая была погружена на глубину 10 м. В непосредственной близости от антенны буя был опущен калиброванный гидрофон.

Приёмный тракт буя обеспечивает приём сигналов в диапазоне 1–15 кГц. Антенна буя оборудована волоконно-оптическим компасом, позволяющим безынерционно определять текущую ориентацию антенны буя по горизонту с СКП 0,3°. Пеленг объекта измеряется в полосе 6–12 кГц с СКП 2° (с учётом ошибки компаса).

В качестве источника излучения, ПГП которого определялось, выступал катер, который многократно проходил мимо приёмника на разных дистанциях. 12 проходов были выполнены на скорости 6 узлов и 6 проходов на скорости 22 узла. Скорости катера и кратчайшие расстояния между катером и приёмником, определённые описанным выше способом, приведены в таблице. Расстояние между катером и буюм также контролировалось лазерным дальномером, находящимся на катере. Разница в показаниях составила в среднем 10%.

На рис. 2 показана схема маневрирования катера. Маневрирование катера продолжалось в течение одного часа.

После завершения маневрирования катера и извлечения данных из памяти буя в соответствии с описанной выше методикой для каждого прохода катера

Скорости и кратчайшие расстояния между катером и приёмником на каждом проходе

Номер прохода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Скорость, уз	6,3	6.1	6.2	6.2	6.1	6.2	6.9	6.7	6.8	6.8	6.8	6.2	22,7	22,4	22,3	22,8	22,5	22,2
Кратчайшее расстояние, м	30,6	31,3	23,4	28,7	32,5	23,8	29,9	28,4	19,5	28,1	26,3	26,7	25,6	25,9	21,5	22,4	21,3	33,5

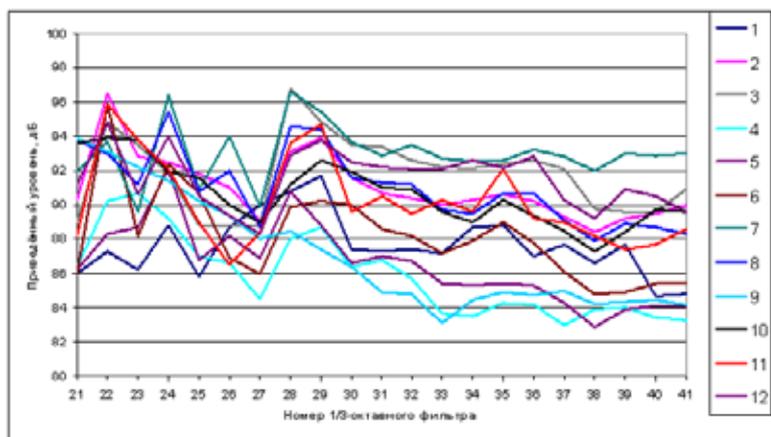


Рис. 3. Приведённые к 1 м уровни шума катера в 1/3-октавных фильтрах при его проходах на скорости 6 узлов, измеренные по данным калиброванного гидрофона

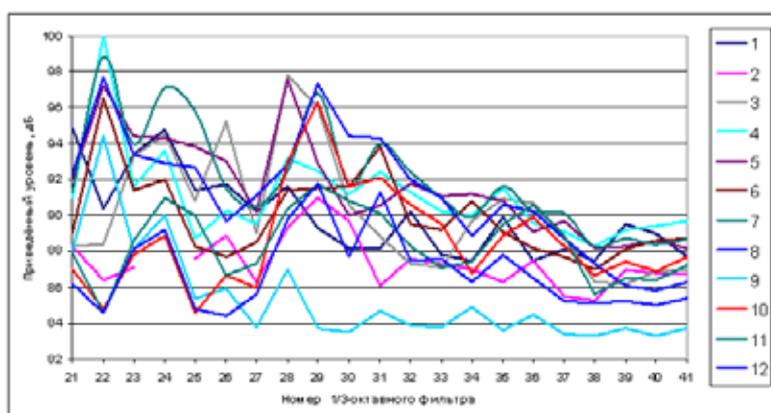


Рис. 4. Приведённые к 1 м уровни шума катера в 1/3-октавных фильтрах при его проходах на скорости 6 узлов, измеренные по данным буя

были рассчитаны приведённые к 1 м уровни шума катера в каждом 1/3-октавном фильтре по данным калиброванного гидрофона и по данным буя. Затем полученные по данным гидрофона 1/3-октавные спектры, соответствующие одинаковым скоростям катера, усреднялись. Аналогично усреднялись 1/3-октавные спектры, полученные по данным буя. Усреднённые 1/3 октавные спектры использовались для калибровки приёмного тракта буя по формуле (13). После калибровки данные с выхода буя пересчитывались с новыми коэффициентами передачи.

Полученные результаты приведены на рис. 3–8. На рис. 3 и 4 изображены измеренные в 1/3-октавных фильтрах уровни шума объекта, движущегося со скоростью 6 узлов. На рис. 5 и 6 приведены уровни шума объекта, движущегося со скоростью 6 узлов, измеренные в каждой 1/3-октавной полосе и приведённые согласно формуле (11) к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м. Каждая линия на рис. 3–6 соответствует одному проходу катера мимо буя. Нумерация графиков на рис. 3–6 соответствует нумерации проходов в таблице.

На рис. 7 изображены значения уровней шума катера в 1/3-октавных фильтрах, соответствующие скоростям хода катера 6 и 22 узла.

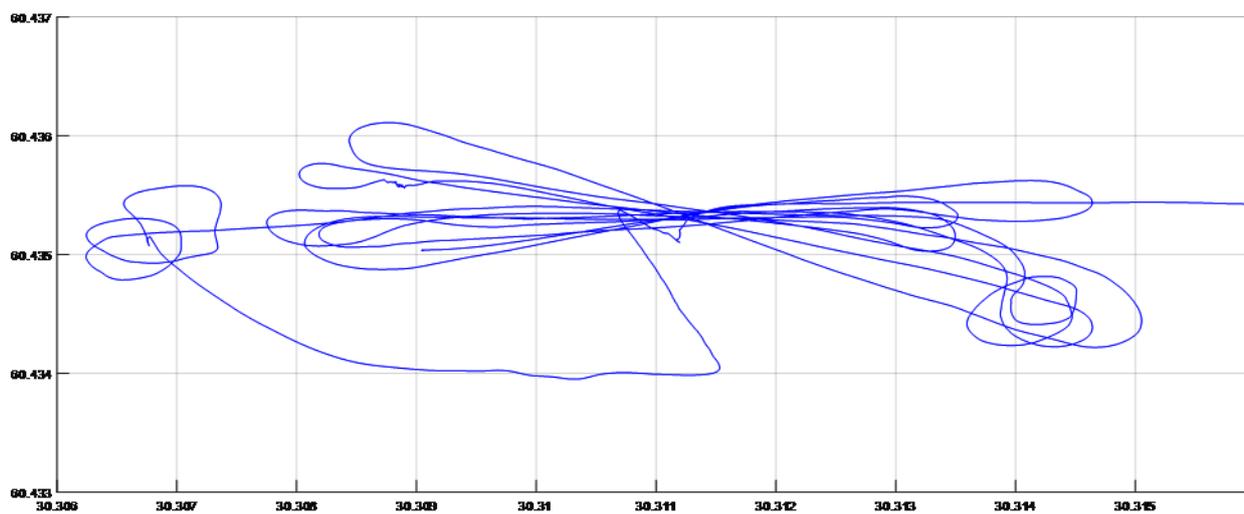


Рис. 2. Схема маневрирования катера

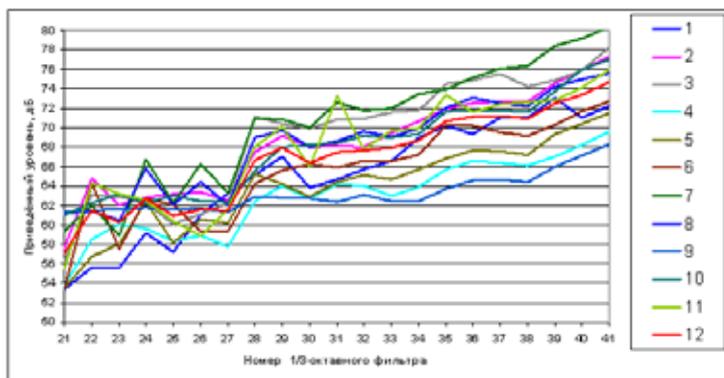


Рис. 5. Уровни шума катера в каждом 1/3-октавном фильтре, приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м при проходах катера на скорости 6 узлов, измеренные по данным калиброванного гидрофона

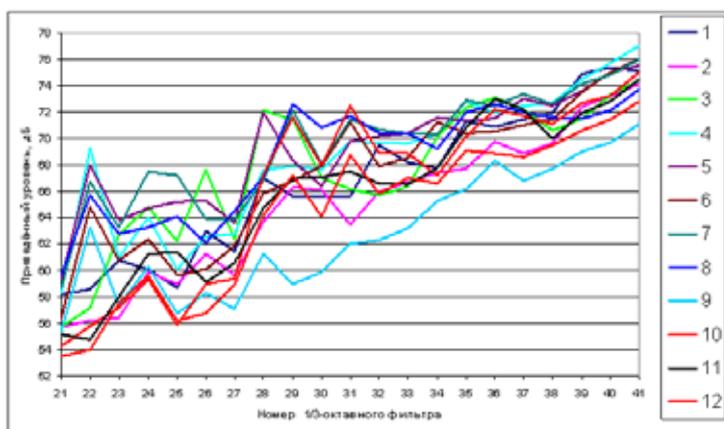


Рис. 6. Уровни шума катера в каждом 1/3-октавном фильтре, приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м при проходах катера на скорости 22 узлов, измеренные по данным бую

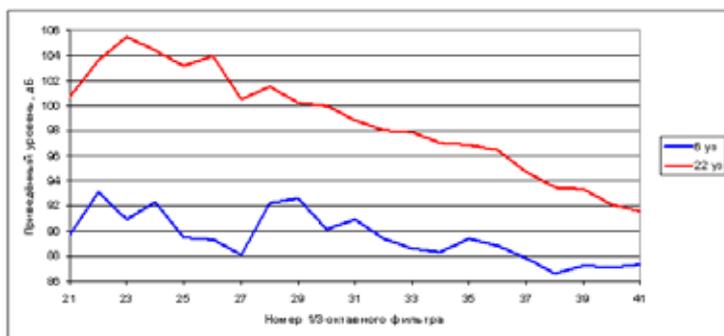
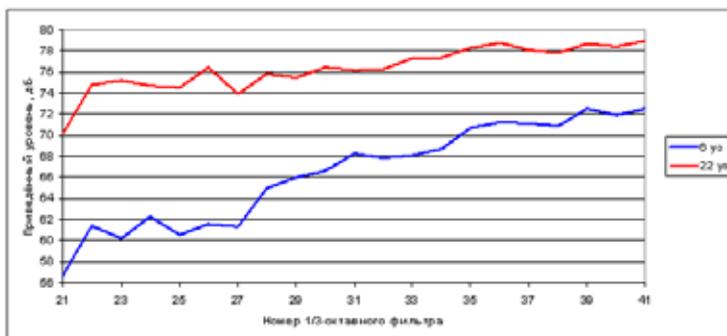


Рис. 7. Уровни шума катера в 1/3-октавных фильтрах, соответствующие скоростям хода катера 6 и 22 узла, измеренные по данным бую



На рис. 8 изображены соответствующие скоростям 6 и 22 узла уровни шума катера в каждом 1/3-октавном фильтре, приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м, измеренные по данным бую.

Из рассмотрения рис. 3–8 можно сделать следующие выводы:

- размах приведённых на рис. 3 и 4 уровней шума катера в одноимённых 1/3-октавных фильтрах, полученных на разных проходах при одной и той же скорости, как по данным калиброванного гидрофона, так и по данным бую не превышает 12 дБ. Из этого можно сделать вывод, что СКП оценки ПГП объекта не превышает 2–3 дБ;
- при увеличении скорости катера с 6 до 22 узлов уровни его шумоизлучения во всех 1/3-октавных фильтрах возросли в среднем на 6 дБ.

## Выводы

В работе предложено оперативно измерять первичное гидроакустическое поле подводных аппаратов с использованием гидроакустического бую с направленной антенной.

Обоснованы требования к организации проведения измерений, обеспечивающие достижение заданной точности результатов. Изложена методика проведения измерений.

Приведены результаты апробации методики, которые подтвердили возможность измерения первичного гидроакустического поля морского объекта со среднеквадратической погрешностью 2–3 дБ, что сопоставимо с точностью, обеспечиваемой стационарными полигонами измерения первичного гидроакустического поля морских объектов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

Рис. 8. Уровни шума катера в каждом 1/3-октавном фильтре, приведённые к частоте 1 кГц, полосе 1 Гц и расстоянию 1 м при проходах катера на скоростях 6 и 22 узла, измеренные по данным бую

## ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров И.Г., Емельянов В.В., Щеголихин В.П., Чумаков В.В. Скрытность и защита кораблей по физическим полям URL: <https://telegra.ph/Skrytnost-i-zashchita-korablej-po-fizicheskim-polyam-Referat-Istoriya-tehniki-09-26> (дата обращения: 10.05.2023).
2. Маненко В.А., Мильшин В.Н., Селезнёв В.М. Зарубежные технические средства измерения физических полей кораблей // Военная мысль. 2019. №8. С. 143–149.
3. Пархоменко В.Н., Сазонов С.П. Важнейший элемент инфраструктуры флота // Материалы 5-ой Международной конференции и выставки по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех 2003». СПб, Моринтех. 2003. С. 33–36.
4. ГОСТ 17168-82. Фильтры электронные октавные и третьоктавные. Общие технические требования и методы испытаний: государственный стандарт союза ССР: дата введения 01.01.1983 / Государственный комитет СССР по стандартам. М.: Издательство стандартов, 1982. 18 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 273 с.

## Сведения об авторах

**ЖУМЕНКОВ Сергей Васильевич**, начальник научно-исследовательского сектора

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

**Область научных интересов:** проектирование гидроакустической техники

**E-mail:** zhymentkov@mail.ru

**Тел.:** +79217735015

**ORCID:** 0009-0000-6310-3216

**МАШОШИН Андрей Иванович**, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

**Область научных интересов:** гидроакустика, системы распознавания и управления, моделирование, робототехника

**E-mail:** aimashoshin@mail.ru

**Тел.:** +79217632345

**ORCID:** 0000-0002-4785-966X

**КОНЮХОВ Геннадий Вячеславович**, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского группы

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

**Область научных интересов:** проектирование гидроакустической техники

**E-mail:** kongv1@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0003-2415-9713

**ПЕСТЕРЕВ Иван Сергеевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

**Область научных интересов:** проектирование гидроакустической техники

**ORCID:** 0000-0002-4263-5114

**Для цитирования:**

Жуменков С.В., Конюхов Г.В., Машошин А.И., Пестерев И.С. МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 3 (45). С. 4–13. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_45\_03\_01. EDN: QFFHZJ.

# MOBILE TEST SITE FOR MEASURING THE PRIMARY HYDROACOUSTIC FIELD OF UNDERWATER VEHICLES

**S.V. Zhymenkov, G.V. Konyukhov, A.I. Mashoshin, I.S. Pesterev**

Annotation. The paper proposes to promptly measure the primary hydroacoustic field (PGF) of underwater vehicles (PA) using a mobile polygon based on a hydroacoustic buoy with a directional antenna. The conditions under which the measurement accuracy will meet the specified requirements are justified. It is shown that the accuracy of determining the distance between the PA and the buoy has the greatest influence on the accuracy of measurements. An algorithm for determining this distance is given, based on the use of the measured bearings of the PA and the known speed of the PA. A formalized method of measuring the GWP of the PA is described, including, among other things, calibration of the receiving path of the buoy. The results of testing the technique in the conditions of Lake Ladoga by measuring the GWP of a boat repeatedly passing by a hydroacoustic buoy with a directional antenna at speeds of 6 and 22 knots are presented. The accuracy of determining the GWP according to the results of testing was 2-3 dB.

**Keywords:** underwater vehicle, primary hydroacoustic field, hydroacoustic buoy, method of measuring the primary hydroacoustic field.

## References

1. Zakharov I.G., Emelyanov V.V., Shchegolikhin V.P., Chumakov V.V. Skrytnost-i-zashchita-korablej-po-fizicheskim-polyam (Stealth and protection of ships by physical fields) [Electronic resource]. <https://telegra.ph/Skrytnost-i-zashchita-korablej-po-fizicheskim-polyam-Referat-Istoriya-tehniki-09-26> (accessed: 10.05.2023).
2. Manenko V.A., Milshin V.N., Seleznev V.M. Zarubezhniy tekhicheskie sredstva izmereniya fizicheskikh polei korablei (Foreign technical means of measuring physical fields of ships). Military thought. 2019. No. 8. pp.143-149.
3. Parkhomenko V.N., Sazonov S.P. Vazneishie elementi infrastruktury flota (The most important element of fleet infrastructure). SPb, Morintech. 2003. pp.33-36.
4. GOST 17168-82. Filtri octavnii i tretoktavnii. Obshnie tekhicheskie trebovaniya i metodi ispitaniya (State standard GOST 17168-82. Electronic octave and third octave filters. General technical requirements and test methods).
5. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. Teoria veroyatnostei i eyo inzhenerniy prilozheniya (Probability theory and its engineering applications). M.: Nauka. 1988. 273 p.

## About the authors

**ZHYMENKOV Sergey Vasilevich**, chief of the research sector, JSC «Concern «Elektropribor»  
**Address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30  
**Scientific interests:** in hydroacoustic technique  
**E-mail:** zhymenkov@mail.ru  
**Phone:** +79217735015  
**ORCID:** 0009-0000-6310-3216

**KONYUKHOV Gennadiy Viacheslavovich**, Cand. Sc., chief of the research group  
 JSC «Concern «Elektropribor»  
**Address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30  
**Scientific interests:** in hydroacoustic technique and control systems  
**E-mail:** kongv1@yandex.ru  
**Phone:** +79216537768  
**ORCID:** 0000-0003-2415-9713

**MASHOSHIN Andrei Ivanovich**, Dr. Sc., professor, chief of the research center  
 JSC «Concern «Elektropribor»  
**Address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30  
**Scientific interests:** in underwater acoustics, pattern recognition and control systems  
**E-mail:** aimashoshin@mail.ru  
**Phone:** +79217632345  
**ORCID:** 0000-0002-4785-966X.

**PESTEREV Ivan Sergeevich**, Cand. Sc., researcher  
 JSC «Concern «Elektropribor»  
**Address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30  
**Scientific interests:** in hydroacoustic technique and control systems  
**ORCID:** 0000-0002-4263-5114