

## Применение технологий нелинейной акустики для поиска биоресурсов на мелководье

*С.П. Тарасов, В.А. Воронин, П.П. Пивнев, Г.Ж. Аюпджанян*  
*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Поиск и определение количества биоресурсов – актуальная задача, как с точки зрения продовольственной безопасности РФ, так и с точки зрения экологии. Большинство биоресурсов в океане концентрируется в мелководных зонах (на глубинах от 1 до 200м). В работе приведены результаты разработки параметрического гидролокатора траверзного обзора для поиска биоресурсов на мелководье. Сделан расчет энергетической дальности действия параметрического гидролокатора траверзного обзора.

Приведены натурные морские испытания разработанного макета гидролокатора траверзного обзора в Таганрогском заливе Азовского моря (условия мелководья). Средняя глубина полигона составляла 2,2 метра. Рассмотрена осциллограмма строки записи эхограммы при определении максимальной дальности обнаружения цели на мелководье (отраженный сигнал от цели на расстоянии 1100 м) и эхограмма от цели, которая удаляется от антенны гидролокатора траверзного обзора на расстояние до 800 м.

Сделаны выводы о перспективности применения параметрических гидролокаторов траверзного обзора для поиска рыбных скоплений на мелководье.

**Ключевые слова:** траверзный обзор, параметрический гидролокатор, поиск биоресурсов, мелководье, энергетическая дальность действия.

### Введение

Определение количества биоресурсов - актуальная и сложная научно-техническая задача, как с точки зрения продовольственной безопасности страны, так и с точки зрения экологического мониторинга водоема. Одним из основных направлений морской деятельности России на ближайшую перспективу является освоение Мирового океана, как наиболее перспективного источника природных ресурсов, в том числе, биоресурсов. В то же время большинство биоресурсов в океане концентрируется в зонах, расположенных в большинстве своем на мелководье на глубинах от 1 до 100 – 200 м [1]. Поиск и определение их запасов в таких местах - задача технологически сложная.

В условиях мелководья гидроакустическая аппаратура устанавливается на судах малого водоизмещения и традиционные гидроакустические приборы (эхолоты и гидролокаторы) не позволяют эффективно проводить

---

поиск и оценку запасов рыбных ресурсов [2]. Кроме того, наличие на мелководье близких дна и поверхности моря создаёт условия, препятствующие нормальному распространению акустических волн, связанные с поверхностной и донной реверберацией [3, 4].

Причины, мешающие поиску на мелководье, заключаются в наличии помех от дна и поверхности за счет широкой характеристики направленности и присутствия в ней боковых лепестков, наличии носителей звуков, распугивающих объекты промысла [5].

Наиболее перспективными для работы на мелководье являются гидролокаторы горизонтального (траверзного) действия с параметрическим режимом. При этом удастся удовлетворить практически все указанные противоречивые требования. Наличие в характеристике направленности, низкого уровня бокового поля, небольших размеров и массы антенной системы при работе на сравнительно низких частотах, дают возможность эффективного использования параметрических гидролокаторов с целью расширения поисковых возможностей аппаратуры в условиях мелкого моря.

Одной из причин, затрудняющих применение параметрических антенн в гидроакустических системах, является низкий коэффициент преобразования энергии волн накачки в энергию рабочих (низкочастотных) волн [6]. Исследования показывают, что увеличение эффекта преобразования волн накачки в низкочастотные волны возможно, если увеличить концентрацию энергии волн накачки путем обужения характеристики направленности антенны и увеличить удельную акустическую мощность снимаемой с активной поверхности антенны. Однако уменьшение ширины характеристики направленности антенны ведет к потере информации об объектах исследования. Поэтому в гидролокаторе траверзного обзора необходимо применять специальные меры для расширения характеристики направленности. К таким мерам можно отнести расширение характеристики

---

направленности в горизонтальной плоскости применением секторных параметрических антенн с разворотом парциальных антенн накачки на некоторый угол, и создание тем самым секторной характеристики направленности в горизонтальной плоскости. Применение такого способа построения антенны позволяет также осуществлять переключение ширины характеристики направленности, что может быть дополнительной опцией в гидролокаторе.

Низкая эффективность преобразования энергий может сказаться на дальности действия локатора, поэтому проведем исследования, которые определяют границы применения данной системы [7, 8].

В институте нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники совместно с предприятием ООО «НЕЛАКС» проводятся такие исследования, некоторые результаты которых приведены в настоящей работе.

### **Энергетическая дальность действия параметрического гидролокатора траверзного обзора**

Определим значение необходимой мощности излучения сигналов антенной параметрического гидролокатора траверзного обзора для достижения дальности действия, определенной в технологическом барьере для оценки количества биоресурсов на мелководье. Дальность действия существенно зависит от условий распространения акустической энергии, в связи с чем различают энергетическую дальность в однородной (безграничной) среде и дальность действия в реальных условиях. При проектировании и расчете гидролокаторов, как правило, оперируют энергетической дальностью действия.

Принцип действия параметрического гидролокатора траверзного обзора, как и любого другого, основан на использовании эффекта нелинейного взаимодействия волн в канале совместного распространения [9, 10]. Однако методика расчета основана на использовании уравнения гидролокации, как и для гидролокаторов, работающих в обычном режиме [11,12]:

$$I_c = \delta^2 I_n, \text{ или } P_c = \delta P_n, \quad (1)$$

где  $I_c, P_c$  - интенсивность и звуковое давление эхо-сигнала в точке приема;  $I_n, P_n$  - интенсивность и звуковое давление помех;  $\delta$  - коэффициент распознавания, определяющий отношение сигнал/помеха на входе тракта обработки, которое обеспечивает регистрацию сигнала с заданными значениями вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

Однако методика расчета характеристик параметрических гидролокаторов имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой тракта излучения, поскольку амплитуда звукового давления, падающего на лоцируемый объект, образуется в результате взаимодействия волн накачки в процессе распространения и взаимодействия их в среде, а величины в правой части уравнения (1) для параметрических гидролокаторов определяются, исходя из тех же соображений, что и для обычных (с традиционной излучающей антенной) с учетом всех параметров приемного и излучающего трактов и помеховой обстановки [13].

Уровень звукового давления эхо-сигнала в точке приема гидроакустической станции при использовании параметрического излучения определится с учетом взаимодействия волн накачки при их распространении, затухания этих волн, рассеяния и затухания волн, образованных в результате взаимодействия волн накачки, коэффициентов концентрации антенн накачки и приемных антенн. Необходимо отметить, что излучающая параметрическая антенна на разностной частоте необратима, поэтому для приема

образованных в результате взаимодействия волн накачки необходимо применять либо антенны накачки вдали от резонанса, либо использовать отдельные малонаправленные приемные антенны.

Низкий коэффициент преобразования энергии волн накачки в энергию волн разностной частоты ограничивает дальность действия гидролокатора с параметрической антенной, поэтому применяют увеличение энергии в излучении за счет увеличения длительности излучаемого сигнала, которая в свою очередь ведет к снижению разрешающей способности локатора по дальности.

Одним из существенных выигрышей параметрической антенны является ее широкополосность, поэтому в параметрическом гидролокаторе траверзного обзора используются сложные сигналы с большой длительностью и большой полосой частот. Это приводит при обработке к увеличению дальности локации при сохранении необходимой разрешающей способности по дальности.

Используя методику [6] и учитывая, что рабочей частотой в случае параметрического режима является средняя разностная частота  $F$ , получим выражение, описывающее зависимость излучаемой акустической мощности от расстояния при всех прочих известных величинах:

$$W_{\alpha} = \frac{P_{no} 10^3 4I_D^2 x 10^{0,05\beta x} e^{x/L_3} K_5 \sqrt{\Delta F}}{R_3 F^2 \alpha L_D \sqrt{\tau \gamma_{np}} I(B, \gamma) \gamma_{нзл} \rho c \sqrt{B}}, \quad (2)$$

где  $P_{no}$  - эффективное значение акустического давления помехи при стандартных условиях:  $f = 1$  кГц,  $\Delta f = 1$  Гц,  $\gamma_{np} = 1$ ;  $B = \Delta f \tau$  - база сигнала;  $\Delta f$  - полоса частот, занимаемая сигналом;  $\tau$  - длительность сигнала;  $x$  - расстояние до цели;  $R_3$  - радиус эквивалентной сферы;  $\beta$  - коэффициент пространственного затухания на разностной частоте;  $\alpha = \frac{\gamma+1}{4\rho_0 c_0^2}$  - параметр

нелинейности;  $L_D = \frac{\alpha^2 L_z}{4c_0}$  - длина области дифракции волны разностной частоты;  $L_z = 1/\beta$ ;  $\beta$  - коэффициент затухания звука на разностной частоте;  $F$  - разностная частота;  $\Omega = 2\pi F$ ;  $P_{01}$ ,  $P_{02}$  - амплитуды давления волн накачки у поверхности антенны;  $c_0$  - скорость звука;  $a$  - апертура излучателя накачки;  $\gamma$  - нелинейный параметр (для воды принимается равным 7,1);  $\rho_0$  - равновесная плотность среды;  $I(B1, y) = \int_0^y \frac{\exp[-z - \frac{r_W^2(1+iB1z)}{d+yzeB1+i(z-y)}]}{d+yzeB1+i(z-y)} dz$  - член учитывающий параметры нелинейного взаимодействия волн;  $y = \frac{x}{l_3}$  ;  
 $r_W^2 = \frac{2r^2 L_D}{\alpha^2 l_3}$  ;  $B1 = \frac{L_D l_3}{l_{D1} l_{D2}}$  ;  $d = \frac{L_D}{l_3}$  ;  $l_{D1} l_{D2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$  - длина зоны дифракции для волн накачки;  $\omega_{1,2}$  - круговая частота волн накачки;  $l_3 = 1/\alpha_{1,2}$  - длина зоны затухания для волн накачки;  $\alpha_{1,2}$  - коэффициент затухания на частотах накачки;  $r$  - координата поперек оси пучка.

Используя выражение (2), были рассчитаны значения мощности подаваемые на антенну накачки по каждой из частот накачки для следующих параметров: для одиночной рыбы с радиусом эквивалентной сферы  $R_{экр} = 0,1$  м и рыбного скопления с  $R_{экр} = 1$  м для пресной воды, коэффициент надежности приема  $K_\delta$  принят равным 2, что соответствует отношению сигнал/помеха 2,8, уровень приведенных помех  $P_{no} = 0,01$  Па и длительность импульса 5 мс. В качестве зондирующего импульса выбран импульс с линейной частотной модуляцией в диапазоне частот от 10 до 50 кГц в течении длительности импульса. Рассчитанные зависимости приведены на рис. 1.

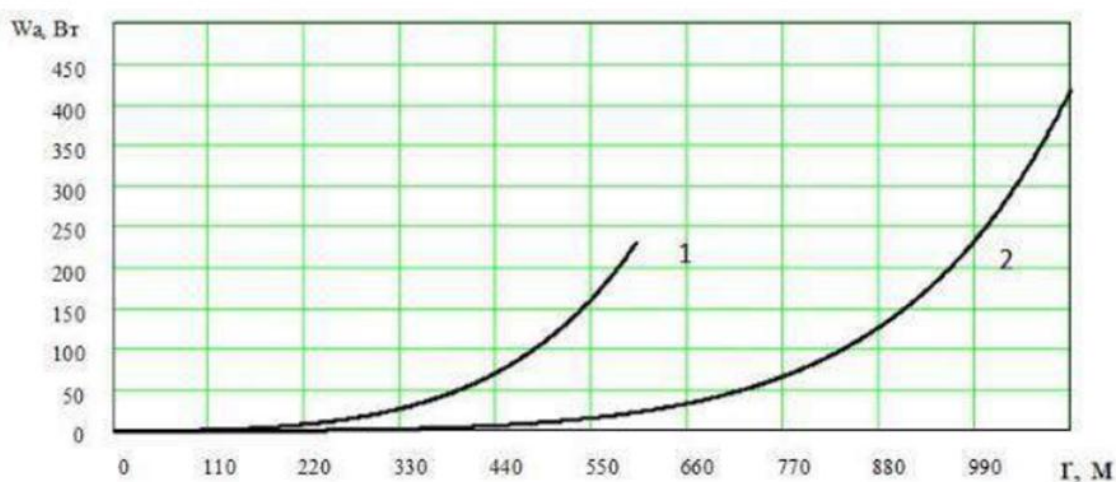


Рис. 1. – Зависимость необходимой акустической мощности с антенны накачки для достижения необходимой дальности лоцирования цели с эквивалентным радиусом цели 1 – 0,1 м.; 2 – 1 м.

### **Результаты натуральных испытаний макета параметрического гидролокатора траверзного обзора**

Для проверки правильности предположений и расчетов, проведенных выше, был разработан и изготовлен макет параметрической антенны для гидролокатора траверзного обзора [14]. Натурные морские испытания разработанного макета проводились в условиях мелководья в Таганрогском заливе Азовского моря. Средняя глубина полигона составляла 2,2 метра.

На рис. 2 приведена осциллограмма строки записи эхограммы при определении максимальной дальности обнаружения цели на мелководье. Соотношение сигнал – помеха на расстоянии более 1100 м составляет более двух, что подтверждает сделанные предположения и расчеты.



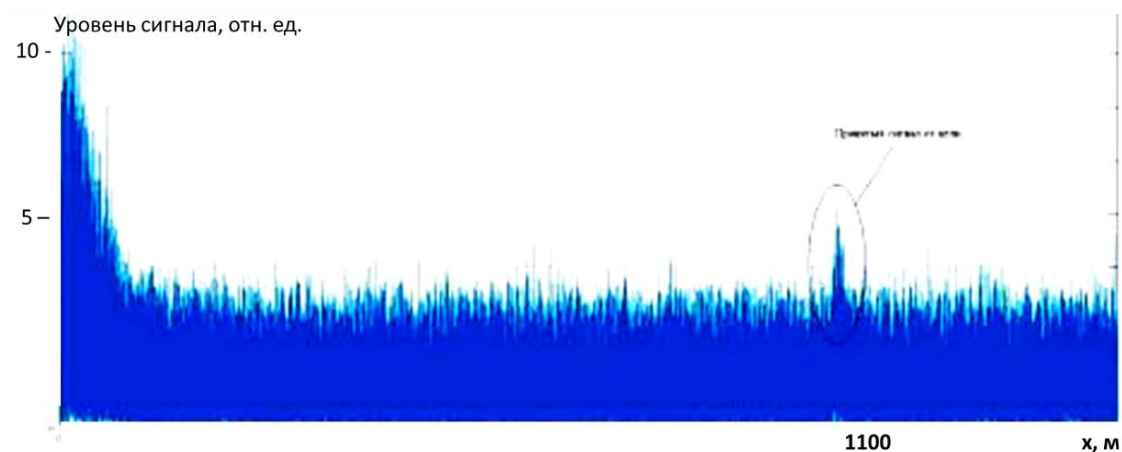


Рис. 2 – Строка записи эхограммы цели

На рис. 3 показана эхограмма от цели, которая удаляется от антенны гидролокатора траверсного обзора на расстояние до 800 м.

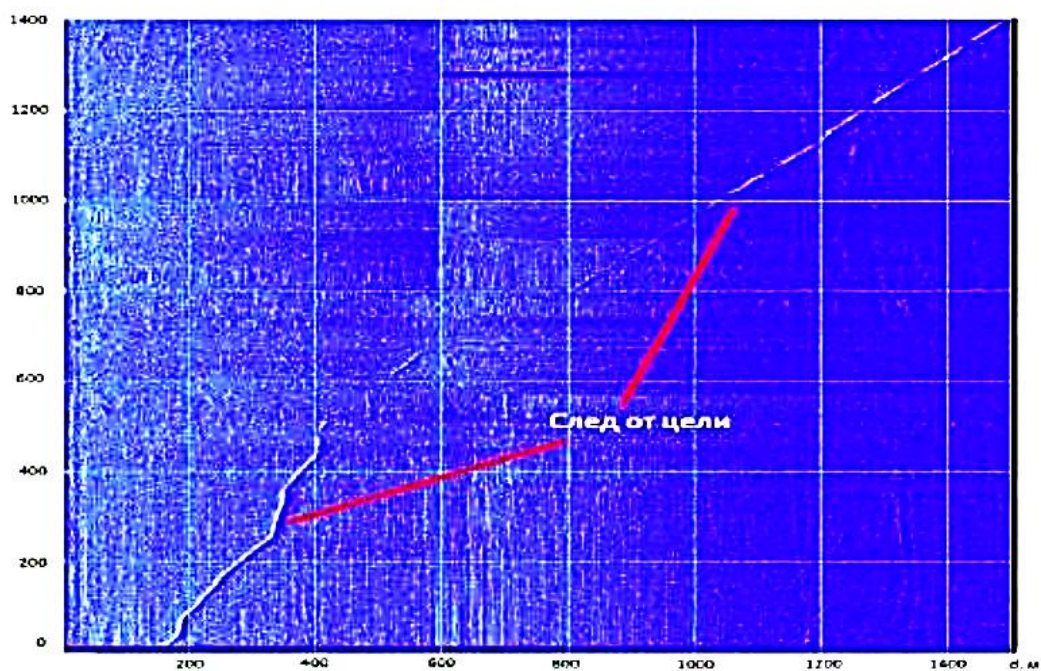


Рис. 3. – Эхограмма удаляющейся цели. Прерывистый след в центре записи обусловлен выходом цели за пределы характеристики направленности



## Выводы

Анализ результатов расчетов показывает, что технологический барьер в определении запасов биоресурсов может быть преодолен с использованием траверзного гидролокатора с параметрическим режимом излучения сигналов. Проведенные натурные испытания показали возможности работы параметрического гидролокатора траверзного обзора в условиях мелководья на больших расстояниях (порядка 1 км).

## Литература

1. Тикунов А.И. Рыбопоисковые приборы и комплексы. Л.: Судостроение, 1989. 287 с.
2. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. Основы и применения. М.: Мир, 1980. 580 с.
3. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л.: Судостроение, 1966. 354 с.
4. Орлов Л. В., Шабров А. А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота. Л.: Судостроение, 1987. 223 с.
5. Simrad MS70, Scientific multibeam sonar system. URL: [instructionsmanuals.com/sites/default/files/2019-06/Simrad-MS70-en.pdf](http://instructionsmanuals.com/sites/default/files/2019-06/Simrad-MS70-en.pdf).
6. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 400 с.
7. Nabaek H. and Vesterheim M. Properties of the parametric acoustic array in different parametric regions. - 6th International Symposium on Nonlinear Acoustic. Moscow, v.1, p. 272-289.
8. Westervelt P.J. Parametric Acoustic Array. - J. Acoust. Soc. Amer., 1963, 35, p.535-537.
9. Пивнев П.П. Параметрические широкополосные системы мониторинга и связи в гидроакустике // Инженерный вестник Дона, 2019. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714).

10. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water// Geol. Soc. Am. Mem. 1948. Vol. 27. pp. 1-117.
11. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1981. 206 с.
12. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
13. Кабаков Л.С., Сидько В.М., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Применение параметрических антенн в промышленной гидроакустике/ В кн. "Прикладная акустика". Таганрог: ТРТИ, 1983. Том 10. с. 75-82.
14. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Широкополосные гидроакустические антенны систем экологического мониторинга водной среды и придонных осадочных пород // Инженерный вестник Дона, 2015. - №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476).

### References

1. Tikunov A.I. Ryboposkovyye pribory i komplekсы [Fish-hunting devices and complexes]. L.: Sudostroyeniye, 1989. 287 p.
  2. Kley K., Medvin G. Akusticheskaya okeanografiya. Osnovy i primeneniya [Acoustic oceanography. Basics and applications]. M.: Mir, 1980. 580 p.
  3. Stashkevich A.P. Akustika moray [Acoustics of the sea]. L.: Sudostroyeniye, 1966. 354 p.
  4. Orlov L. V., Shabrov A. A. Gidroakusticheskaya apparatura rybopromyslovogo flota [Hydroacoustic equipment of the fishing fleet]. L.: Sudostroyeniye, 1987. 223 p.
  5. Simrad MS70, Scientific multibeam sonar system. URL: [instructionsmanuals.com/sites/default/files/2019-06/Simrad-MS70-en.pdf](http://instructionsmanuals.com/sites/default/files/2019-06/Simrad-MS70-en.pdf).
-

6. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. *Gidroakusticheskiye parametricheskiye sistemy* [Hydroacoustic parametric systems]. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2004. 400 p.
7. Habaek H. and Vesterheim M. Properties of the parametric acoustic array in different parametric regions. 6th International Symposium on Nonlinear Acoustic. Moscow, 2002. v.1, pp. 272-289.
8. Westervelt P.J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1963, 35, pp.535-537.
9. Pivnev P.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2019. №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714).
10. Pekeris C.L. *Geol. Soc. Am. Mem.* 1948. Vol. 27. pp. 1-117.
11. Matviyenko V.N., Tarasyuk YU.F. *Dal'nost' deystviya gidroakusticheskikh sredstv* [The range of hydroacoustic means]. L.: Sudostroyeniye, 1981. 206 p.
12. Yevtyutov A.P., Mit'ko V.B. *Inzhenernyye raschety v gidroakustike* [Engineering calculations in hydroacoustics]. L.: Sudostroyeniye, 1988. 288 p.
13. Kabakov L.S., Sid'ko V.M., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. *Primeneniye parametricheskikh antenn v promyslovoy gidroakustike* [Application of parametric antennas in commercial hydroacoustics]. V kn. "Prikladnaya akustika". Taganrog: TRTI, 1983. Vyp.X. pp. 75-82.
14. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2015. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476).