

А. Н. Куценко, Д. С. Слуцкий

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЦЕЛЯХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ

В статье рассматривается задача классификации донных осадков в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий. Существующие методы профилирования и классификации донных осадков не дают достоверной информации. Предлагается метод классификации материалов донного грунта по коэффициенту затухания акустических сигналов. Данный метод позволяет повысить точность определения слоистой структуры дна и классифицировать донные осадки.

Слоистая структура; экологический мониторинг; коэффициент затухания.

A. N. Kutsenko, D. S. Slutsky

THE QUESTION OF BOTTOM SEDIMENTS CLASSIFICATION TO ECOLOGICAL MONITORING OF SHOALING WATER

The task of bottom sediments classification for shore area of water ecological monitoring is considered in this article. Existing methods of shape removal and bottom sediments classification don't give correct information. The method of bottom sediments classification by acoustic signals fading coefficient is proposed in this article. This method is made possible to increase precision of bottom stratum structure determination and to determine bottom soil substance in every layer.

Stratum structure; ecological monitoring; attenuation coefficient.

В настоящее время существует проблема профилирования донных осадков. Достоверная и точная информация о профиле и материале грунта необходима при экологическом мониторинге прибрежных акваторий, при строительстве различных гидротехнических сооружений (дамбы, плотины, гидроэлектростанции, мосты), при прокладке глубоководных кабелей, нефте- и газопроводов, а также при поиске полезных ископаемых, расположенных в толще донного грунта, в первую очередь, нефти. Последнее особенно актуально в связи с перспективой освоения шельфа Северного Ледовитого океана.

Хозяйственная деятельность человека приводит к постоянному загрязнению окружающей среды нефтью и нефтепродуктами, промышленными отходами, сточными водами. Оценка степени загрязнения донных осадков в реках и прибрежных акваториях обычными методами представляет собой трудоемкий процесс, вследствие того, что для определения материала и степени загрязнения образцы донного грунта собираются механически. Такой способ сбора информации трудоемок и затратен, а при больших глубинах невозможен. Для устранения этих недостатков необходима система дистанционного профилирования и классификации донных осадков.

Задача профилирования донного грунта обычно решается с помощью гидроакустических средств. Для решения подобных задач наиболее перспективными, в настоящее время, считаются параметрические профилографы, которые за счет высокой мощности излучения, низкой частоты зондирующего сигнала и узкой характеристики направленности позволяют проникнуть в толщу донного грунта. Рассе-

янные донными отложениями акустические волны несут информацию о физико-химических свойствах грунтов, по которым можно проводить их классификацию. В настоящее время при классификации материала донного грунта ограничиваются определением его акустического импеданса и скорости звука в нем. Существуют несколько способов определения этих параметров – путем измерения амплитудного и спектрального коэффициента отражения от границы раздела, сравнения фаз излученного и принятого сигналов, измерения критического угла отражения [1].

Все вышеперечисленные методы имеют низкую точность вследствие значительного затухания акустического сигнала в толще донного грунта и воздействия помех, которые искажают принимаемый сигнал. Из-за воздействия помех невозможно точно определить амплитуду и начальную фазу принятого сигнала.

Глубоководные сейсмические исследования указывают на почти повсеместный многослойный характер структуры донных осадков. Амплитуда акустического сигнала быстро затухает и рассеивается на границах раздела. Поэтому с каждым последующим слоем все сложнее определить его толщину и акустические параметры.

Предлагаемый метод позволит увеличить точность классификации материалов донного грунта. Известно, что коэффициент затухания акустических колебаний в грунте зависит от частоты. Это означает, что при излучении в грунт широкополосного сигнала ослабление сигнала в грунте будет неравномерным на разных частотных составляющих излученного сигнала. Таким образом, путем восстановления закона затухания акустического сигнала в грунте можно определить коэффициент затухания звука в грунте. Зная коэффициент затухания и скорость звука в грунте, можно оценить его акустический импеданс, что позволит провести классификацию исследуемого слоя донных осадков.

Для сравнения излученного и принятого сигнала целесообразно применять корреляционные обнаружители, поскольку использование корреляционного обнаружителя позволяет определить степень отличия принятого сигнала от излученного при помощи введения взаимной корреляционной функции.

Задача восстановления закона затухания достигается тем, что для вычисления взаимной корреляционной функции используется сигнал с заранее известным законом затухания. Путем подбора закона затухания для различных материалов осадочных пород достигается максимум автокорреляционной функции. Полученный максимум позволяет определить состав грунта в данном слое осадочных пород.

Для проверки этой теории был проведен расчет взаимной корреляционной функции модели сигнала с неизвестным законом затухания и модели сигнала с восстанавливаемым законом затухания. В качестве излучаемого широкополосного сигнала был взят ЛЧМ-сигнал. Модель сигнала с законом затухания в исследуемом слое донных осадков можно представить в виде

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\beta(\omega) \cdot x(t)} \cdot \cos(\omega(t) \cdot t), \quad (1)$$

где A_0 – максимальная амплитуда сигнала; $x(t)=c \cdot t$; $\omega(t) = \omega \cdot t + \frac{\Delta\omega}{\tau} \cdot t^2$ – закон изменения частоты сигнала; $\Delta\omega$ – девиация частоты; τ – длительность импульса; $\beta(\omega)$ – искомый коэффициент затухания.

Для восстановления закона затухания целесообразно использовать методы полиномиальной интерполяции зависимости коэффициента затухания от частоты. Существуют несколько методов полиномиальной интерполяции – интерполяция полиномами Лагранжа, Ньютона и методом наименьших квадратов [2].

Интерполяция полиномами Лагранжа и Ньютона применяется для восстановления функции по нескольким ее значениям. При обработке реальных гидроакустических сигналов необходимо учитывать воздействие помех, которые случайным образом искажают амплитуду и фазу принятого сигнала. Вследствие воздействия помех очень сложно с достаточной точностью восстановить закон затухания с помощью интерполяции полиномами Лагранжа и Ньютона, так как невозможно определить изменение амплитуды принятого сигнала по сравнению с излученным сигналом, вызванное затуханием акустических волн в донном грунте при наложении на сигнал помехи, случайным образом искажающей закон его затухания.

В случаях, когда неизвестны точные значения амплитуды сигнала в конкретные моменты времени, наиболее точный результат можно получить при помощи интерполяции закона затухания методом наименьших квадратов. Суть метода заключается в следующем: в случае, если функция $y=f(x)$ задана таблицей своих значений: $y_i=f(x_i)$, $i=0, 1, \dots, n$, то можно найти многочлен фиксированной степени m , для которого среднеквадратичное отклонение (СКО)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n (P_m(x_i) - y_i)^2} \quad (2)$$

минимально.

Такой многочлен $P_m(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_mx^m$ определяется коэффициентами $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$. Нашей задачей является подбор набора коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$, минимизирующий функцию:

$$\Phi(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=0}^n (P_m(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^m a_j x_i^j - y_i \right)^2. \quad (3)$$

Подбор осуществляется, используя необходимое условие экстремума, $\partial\Phi/\partial a_k = 0$, $k=0, 1, \dots, m$. Исходя из этого, можно получить нормальную систему метода наименьших квадратов:

$$\sum_{j=0}^m \left(\sum_{i=0}^n x_i^{j+k} \right) a_j = \sum_{i=0}^n y_i x_i^k \quad (4)$$

относительно неизвестных $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$. При высоких степенях m система является плохо обусловленной. Поэтому метод наименьших квадратов применим для нахождения многочленов, степень которых не выше 5. Указанное условие справедливо для большинства известных законов затухания акустических волн в донных осадках.

В качестве известной функции, восстанавливаемой искомым полиномом, рассмотрим зависимость коэффициента затухания от частоты, эмпирическая формула которой имеет вид $\beta = k \cdot f^n$ [3], где частота выражена в кГц, а k и n – постоянные, зависящие от типа грунта, причем значение n может изменяться от 0,5 до 2. На частотах от единиц до сотен кГц коэффициент затухания линейно зависит от частоты – $n \approx 1$. Для интерполяции такой функции достаточно многочлена второго порядка.

Исходя из этого, получим выражение, описывающее сигнал с восстанавливаемым законом затухания:

$$S(t) = A \cdot e^{-(a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2) \cdot x(t)} \cdot \cos(\omega(t) \cdot t). \quad (5)$$

Нормированный корреляционный интеграл сигналов (1) и (2) вычисляется по формуле

$$K = \frac{\int_0^{\tau} A(t) \cdot S(t) dt}{\sqrt{D_A \cdot D_S}}, \quad (6)$$

где D_A и D_S – дисперсии сигналов $A(t)$ и $S(t)$.

Таким образом, нашей задачей является путем подбора коэффициентов интерполирующего полинома $a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2$ определить максимум значения корреляционного интеграла. Наличие максимума позволяет утверждать о совпадении функций $\beta(\omega)$ и $a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2$, то есть о восстановлении закона затухания сигнала в рассматриваемом слое осадочных пород. Путем сравнения полученной функции с известными значениями коэффициентов затухания для различных материалов можно классифицировать осадочные породы.

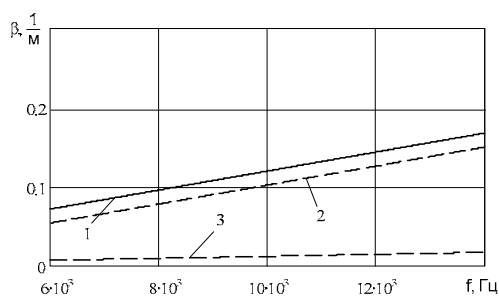


Рис. 1. Усредненная зависимость коэффициента затухания от частоты для песчаного грунта (кривая 1), алевроитовых глинистых пород (кривая 2) и смешанного типа грунта (кривая 3)

Путем анализа данных о коэффициентах затухания акустического сигнала в грунте [3] была выявлена средняя зависимость коэффициента затухания от частоты для разных типов донного грунта. На рис. 1 приведены усредненные зависимости коэффициента затухания от частоты для песчаного грунта (кривая 1), алевроитовых глинистых пород (кривая 2) и смешанного типа грунта (кривая 3). В качестве примера для расчета возьмем закон затухания акустического сигнала в песчаном грунте.

На рис. 2 приведен алгоритм расчета зависимости коэффициента затухания от частоты. Сначала происходит снятие значений амплитуды принятого сигнала. Затем путем подбора происходит поиск максимума значения корреляционного интеграла. После вычислений строится закон затухания $\beta(\omega) = a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2$, который затем сравнивается с известными законами затухания. При совпадении рассчитанного закона затухания с известным законом можно говорить об определении материала данного слоя донных осадков. После всех вычислений информация сохраняется.

Модель акустического сигнала, прошедшего через песчаный грунт, в присутствии помехи, случайным образом искажающей амплитуду сигнала, приведена на рис. 3, а. Путем подбора коэффициентов интерполирующего полинома $a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2$ добиваемся максимума значения корреляционного интеграла (6). В нашем случае корреляционный интеграл равен $5,015 \cdot 10^{-3}$. Сигнал (5) с подобранными коэффициентами, посчитанный при помощи взаимной корреляционной функции, приведен на рис. 3, б.

На рис. 4 приведены исходный закон затухания акустического сигнала, прошедшего через песчаный грунт (кривая 1), и полученный с помощью интерполяции методом наименьших квадратов закон затухания (кривая 2). Видно, что исходный и расчетный законы затухания практически полностью совпадают. Исходный

из этого, можно утверждать, что предлагаемый метод позволяет восстанавливать закон затухания акустического сигнала в данном слое донного грунта.

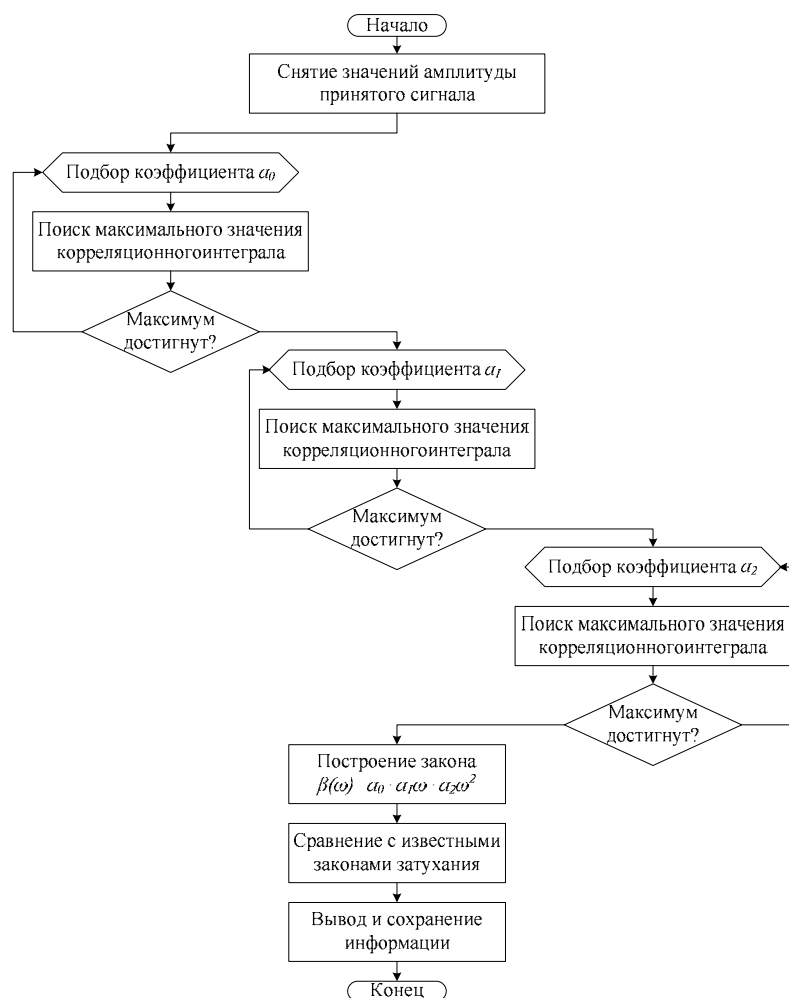


Рис. 2. Алгоритм расчета коэффициента затухания от частоты

Вследствие слоистой структуры донного грунта реальный акустический сигнал будет представлять собой наложение сигналов, отраженных от границ раздела между слоями. В этом случае акустический сигнал, отраженный от первого слоя, будет иметь закон затухания, зависящий от материала первого слоя донного грунта. Сигнал, отраженный от второго слоя при наложении на сигнал от первого слоя будет иметь закон затухания, представляющий собой сумму законов затухания от первого и второго слоев. В результате, сигнал от каждого последующего слоя будет нести информацию не только о законе затухания в этом слое, но и о законах затухания нескольких предыдущих слоев. Также сигнал будет сильно искажен вследствие амплитудной модуляции между разными частотными составляющими.

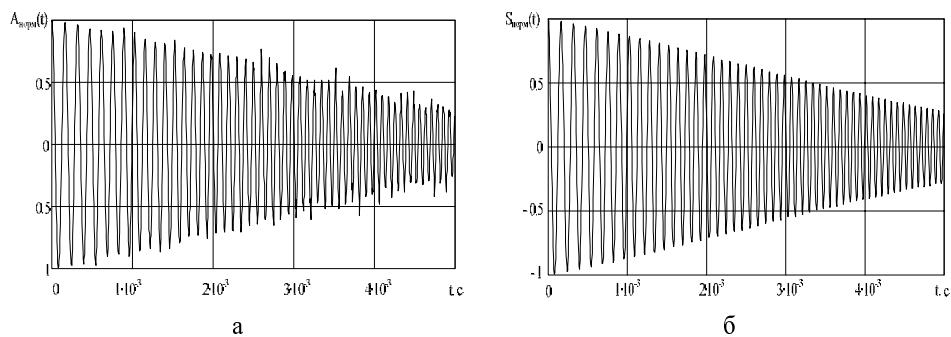


Рис. 3. Модель акустического сигнала, прошедшего через песчаный грунт (а) и модель сигнала с восстановленным законом затухания (б)

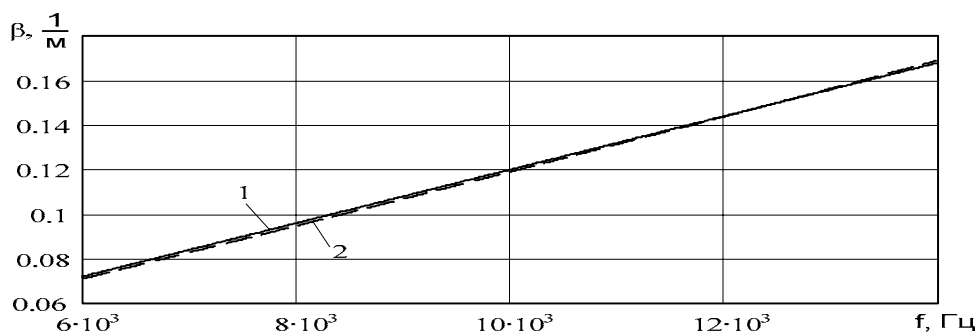


Рис. 4. Исходный (кривая 1) и полученный путем интерполяции (кривая 2) законы затухания акустического сигнала, прошедшего через песчаный грунт

На рис. 5, а приведена модель такого сигнала, состоящая из трех отраженных от разных слоев акустических сигналов в присутствии случайной помехи. На рис. 5, б, 5,в, 5,г приведены сигналы, отраженные от первого, второго и третьего слоев соответственно. На рис. 5, д приведены временные зависимости законов затухания акустического сигнала в этих слоях (кривая 1 – закон затухания в первом слое, кривая 2 – во втором слое, кривая 3 – в третьем слое). Законы затухания акустического сигнала в разных слоях привязаны по времени к сигналам, отраженным от соответствующих слоев.

Из рис. 5,а видно, что сигнал сильно искажен. Но при этом часть сигнала без наложения (от 0 до 2 мс) не искажена и несет в себе информацию о затухании в грунте, что позволяет восстанавливать по приведенной выше методике зависимость коэффициента затухания от частоты для первого слоя грунта. Если из данной модели исключить отраженный от первого слоя донного грунта сигнал, становится возможным восстановить сигнал, отраженный от второго слоя (рис. б) и восстановить закон $\beta(\omega)$ во втором слое.

Таким образом, путем расчета и выделения отраженных сигналов можно восстановить слоистую структуру донных осадков с высокой точностью, определить мощность слоев и провести классификацию донных осадков каждого слоя.

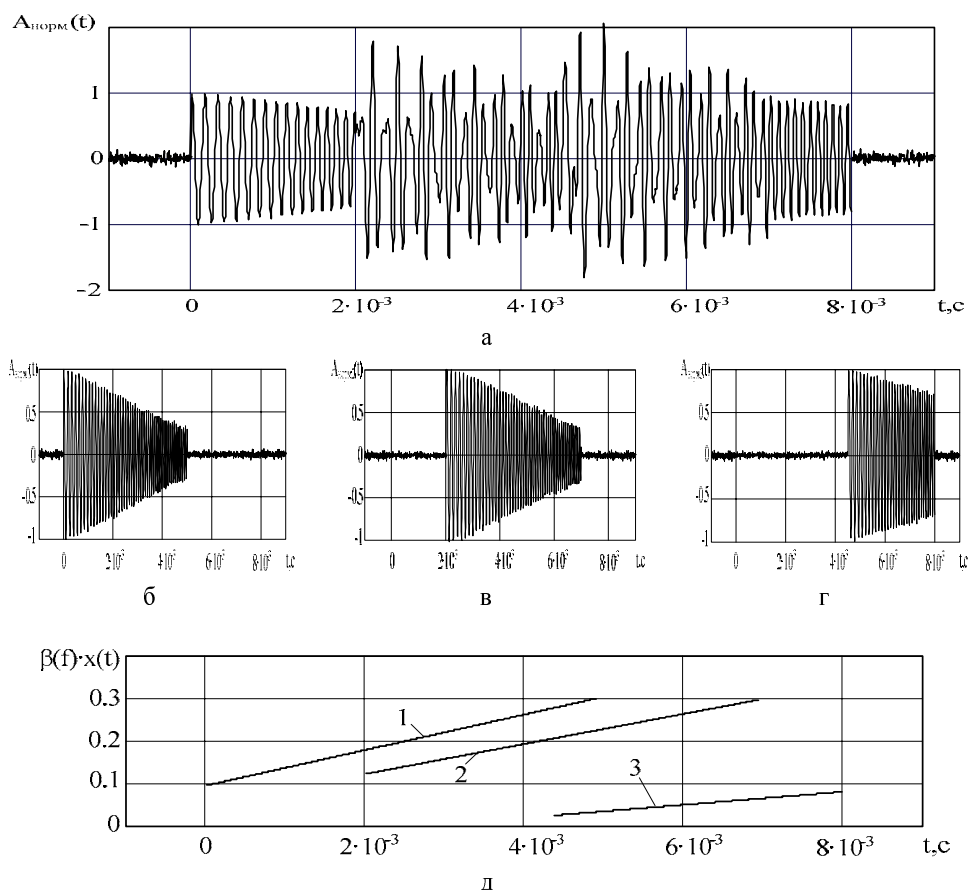


Рис. 5. Модель сигнала, прошедшего через грунт (а), сигналы, отраженные от разных слоев (б, в, г) и законы затухания в этих слоях (д)

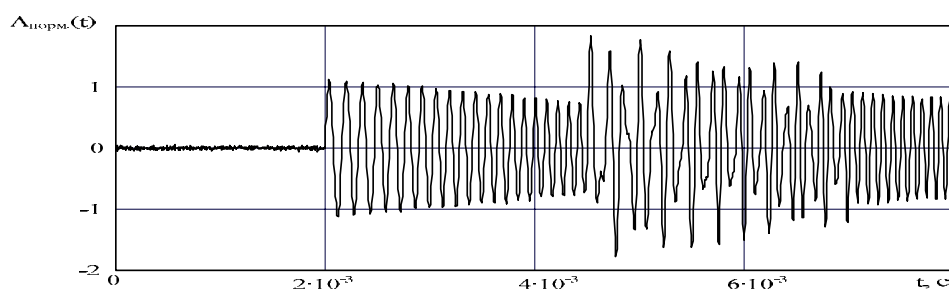


Рис. 6. Модель реального сигнала, прошедшего через грунт с исключенным от первого слоя сигналом

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика. – Калининград, 1997.

2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.:Наука, 1987.
3. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.:Мир, 1977.

Слущкий Денис Сергеевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

Е-mail: sdiman85@mail.ru

347928, Россия, г. Таганрог, ул. Азовская 3, кв.138, тел.: 8-918-510-19-35

Куценко Александр Николаевич

Е-mail: kan1208@mail.ru

Slutsky Denis Sergeevich

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

Е-mail: sdiman85@mail.ru

Flat 138, 3, Azovskaya Str., Taganrog, Rostov region, 347928, Russia

Ph.: 8-918-510-19-35

Kutsenko Aleksandr Nikolaevich

Е-mail: kan1208@mail.ru

УДК 681.883

И. А. Кириченко, П. П. Пивнев, В. А. Воронин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ЭХОЛОТОВЫХ
СИСТЕМ ДЛЯ УЧЕТА РЫБ В РУСЛАХ РЕК**

Целью работы являются исследования по оперативному управлению характеристиками направленности (ХН) акустических антенн, применяемых в составе системы для учета рыб в руслах рек. Результаты лабораторных исследований акустической системы показали возможность управления характеристиками направленности акустических антенн, позволяющее учитывать особенности натурных условий измерений.

Управление характеристикой направленности; эхолотная система.

I. A. Kirichenko, P. P. Pivnev, V. A. Voronin

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DIRECTIONAL CHARACTERISTIC
CONTROL OF ECHO-SOUNDING SYSTEMS FOR FISH REGISTRATION
IN STREAM CANALS**

The work purpose are researches on an operational administration orientation characteristics the acoustic aerials applied as a part of system for the account of fishes in channels of the rivers. Results of laboratory researches of acoustic system have shown possibility of management of characteristics of an orientation of the acoustic aerials, allowing to consider features of natural conditions of measurements.

Directional characteristic control; echo-sounding system.