

УДК 597–151: [639.3.06: 681.88]

Гидроакустический стимулятор как средство управления нагульным поведением рыб*С.М. Гончаров¹, В.Н. Максимов², А.Н. Долгов², Ю.Н. Кравченко¹, С.Б. Попов¹*¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва² Конструкторское бюро морской электроники «Вектор» (КБ МЭ «ВЕКТОР»), г. Таганрог

E-mail: sgonch@vniro.ru

Гидроакустический стимулятор в технологии управления нагульным поведением рыб является необходимым техническим устройством, определяющим ее эффективность. С помощью данной технологии можно повысить рентабельность пастбищной и индустриальной аквакультуры, способствовать развитию рекреационного рыболовства. В данной работе представлены различные конструкции гидроакустических стимуляторов, разработанные на современной элементной базе совместно ФГБНУ «ВНИРО» и КБМЭ «Вектор». Представлены результаты измерений их технических характеристик в сравнении с ранее созданным стимулятором во ВНИРО и используемым для работ с радужной форелью в бухте Тагалахт (о. Сааремаа) Балтийского моря. По результатам измерений дальности действия стимуляторов различной конструкции был создан мобильный гидроакустический комплекс. Данный комплекс успешно использовался при выполнении работ по оценке потенциала перемещения ранее обученного сообщества рыб на акватории экспериментального полигона Вазузского водохранилища.

Ключевые слова: гидроакустический стимулятор, акустический сигнал, нагульное поведение рыб, индустриальная и пастбищная аквакультура, управление поведением рыб.

ВВЕДЕНИЕ

Современные рыбохозяйственные водоёмы и среда обитания водных организмов подвергаются значительной трансформации в результате антропогенного загрязнения, гидротехнического строительства и сельскохозяйственной мелиорации. В результате исчезают традиционные места обитания рыб, их нерестилищ, нагульных и зимовальных биотопов, меняется кормовая база. Решение этой проблемы воз-

можно при снижении антропогенной нагрузки, сохранении и восстановлении среды обитания на акваториях, предназначенных для воспроизводства и пополнения водных биоресурсов. Восстановление деградирующих водоёмов предполагает создание мест обитания рыб, способствующих их максимальной защите от преждевременной гибели.

Традиционный метод восстановления рыбной популяции на водоёмах предполагает их зарыбле-

ние молодью, выращенной на рыбзаводах. Существующие рыбоводные технологии не предполагают контроля за процессом расселением рыб по акватории водоёма. Не имея жизненных навыков выживания в естественных условиях, молодь испытывает стресс и интенсивно поедается хищниками. Гибель молоди в период выпуска в водоём может достигать до 90%, поэтому с целью повышения показателей промыслового возврата рыб необходимо на первоначальном этапе зарыбления перераспределять молодь в места наиболее благоприятные для роста рыб и максимально защищённые от хищников.

Исследования по управлению миграциями рыб с целью топографической оптимизации их нагула и облова разрабатывались в рыбохозяйственной стратегии многих стран с конца XX столетия и практически параллельно проводились в Норвегии, Франции, Японии и России [Воловова, Красюк, 1987; McNeil, 1983; Ishioka et al., 1986]. Ещё в конце прошлого века специалистами лаборатории гидроакустики ФГБНУ «ВНИРО» была успешно отработана и апробирована технология управления пастбищным нагулом и обловом радужной форели (*Salmo gairdneri* Richardson) на Балтике в бухте Тагалахт (о. Сааремаа) на основе гидроакустического стимулирования кормового поведения рыб. Данный метод основан на формировании у рыб в период активного нагула условно-рефлекторного навыка привлечения в зону кормления с помощью звукового сигнала. Если обучение проводить на стадии выращивания молоди на рыбзаводе, то после выпуска в водоём её можно перенаправить в наиболее благоприятные места для выживания и роста.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Важнейшим элементом технологии по управлению поведением рыб является гидроакустический стимулятор, излучающий акустические сигналы. Такие сигналы должны легко восприниматься и запоминаться рыбами.

Ранее для проведения работ на Балтике в бухте Тагалахт (о. Сааремаа) был разработан и создан специалистами ВНИРО гидроакустический стимулятор «Сигнал-М», состоящий из электронного блока и двух гидроакустических преобразователей с излучателями из пластин кристалла сегнетовой соли. Данный стимулятор формирует кодированный сигнал, представля-

ющий ритмически организованную посылку из последовательности четырёх импульсов с частотой заполнения 300 Гц. Порядок следования импульсов следующий: 100, 290, 290, 180 мс с интервалами между импульсами в посылке 180 мс и паузой между посылками — 1,1 с. По сложности организации он находится в вариационном ряду звуков питания рыб разных видов и размеров, что было установлено анализом биоакустических записей, полученных в разное время на различных объектах, в том числе и наших исследований звуков питания форели [Воловова, 1983; Воловова, Шабалин и др., 1986]. К сожалению, к настоящему времени этот стимулятор устарел, как и сама элементная база электронного блока. Технология выращивания кристаллов сегнетовой соли была утрачена в 90-е годы. Поэтому воспроизвести «Сигнал-М» в настоящее время невозможно.

Поэтому, на основании технических параметров «Сигнал-М», ФГБНУ «ВНИРО» и КБ МЭ «Вектор» (г. Таганрог) были разработаны две конструкции электромагнитных стимуляторов: малогабаритный и более лёгкий «ЭМИ» с мембраной из оцинкованного железа и «Сигнал-ТЗЭ» с мембраной из нержавеющей стали и с возможностью одновременного подключения двух акустических преобразователей [Долгов и др., 2017]. Синфазное излучение акустических сигналов с двух преобразователей должно существенно увеличить дистанцию привлечения рыб.

На рис. 1, 2 и 3 представлены фотографии этих излучателей.



Рис. 1. Стимулятор «Сигнал-М»: с двумя излучателями, изготовленными из пластин кристалла сегнетовой соли, соединительный кабель, коммутатор, генератор сигналов



Рис. 2. Малогабаритный электромагнитный стимулятор «ЭМИ»: излучатель с мембраной из оцинкованного железа, соединительный кабель, генератор сигналов



Рис. 3. Стимулятор «Сигнал-ТЗЭ»: два излучателя с мембранами из нержавеющей стали, соединительный кабель, генератор сигналов с возможностью одновременного подключения двух акустических излучателей, аккумулятор 12 Вольт

Для проведения экспериментов по перемещению нагульного рыбного сообщества необходимо было выбрать наиболее подходящий стимулятор для создания мобильного гидроакустического комплекса на базе маломерного судна. Для этого необходимо было провести работы по измерению их технических характеристик. Местом измерения технических характеристик стимуляторов была выбрана гидробиологическая станция ИПЭЭ РАН, расположенная на оз. Глубокое (Московская область). Это место идеально подходит для проведения гидроакустических работ по измерению акустических характеристик излучателей, поскольку в пределах озера отсутствуют какие-либо источники акустических помех. Работы были выполнены в период с 14 июня по 16 июня 2017 года.

Для регистрации сигналов и их последующей обработки использовалась программа Audacity, обеспечивающая выполнение следующих функций:

- импорт и экспорт файлов WAV, MP3, Vorbis, FLAC и других форматов;
- запись с микрофона, линейного входа и других источников;
- запись с одновременным прослушиванием имеющихся дорожек;
- индикаторы уровня записи и воспроизведения;
- изменение темпа с сохранением высоты тона;
- изменение высоты тона с сохранением темпа;
- удаление шума по образцу;

— спектральный анализ с использованием преобразования Фурье.

При измерениях к входу малошумящего усилителя подключался гидрофон, выход усилителя подключался к микрофонному входу встроенной звуковой карты ноутбука. Частотный диапазон стандартных звуковых карт 20—20000 Гц, позволял регистрировать и обрабатывать используемые низкочастотные сигналы. Питание усилителя осуществлялось от USB порта ноутбука. При проведении измерений параметров акустических сигналов, излучаемых преобразователями, сами преобразователи подключались к электронному блоку. Источник питания — аккумулятор с напряжением 12 В.

Преобразователи, электронный блок и аккумулятор были установлены на лодке, регистрирующая аппаратура ВНИРО и КБ



Рис. 4. Функциональная схема проведения измерений

«ВЕКТОР» располагалась на пирсе и была подключена к сети 220 В, 50 Гц.

Измерения проводили на различных расстояниях между преобразователями и гидрофоном, расположенными на глубине порядка 1 м. При проведении измерений также изменяли уровень возбуждающего электрического сигнала, подаваемого на преобразователи, путём переключения диапазона электронного блока. Удаление лодки от пирса определяли с помощью лазерного дальномера.

Излучаемый акустический сигнал, состоял из импульсных последовательностей со следующими временными соотношениями: первый импульс — 100 мс, пауза — 200 мс, второй импульс — 300 мс, пауза — 200 мс, третий импульс — 300 мс, пауза — 200 мс, четвёртый импульс — 200 мс, пауза — 1100 мс. Частота излучаемого акустического сигнала — 300 ± 5 Гц. Возможно также излучение непрерывного сигнала с частотой 300 Гц.

Функциональная схема измерений представлена на рис. 4, схема эксперимента и фрагмент проведения измерений представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Величину напряжения U_s (мВ), снимаемого с гидрофона, определяли по записанным на компьютер сигналам при измерениях по формуле:

$$U_s = U_0 \times (A_s / A_0),$$

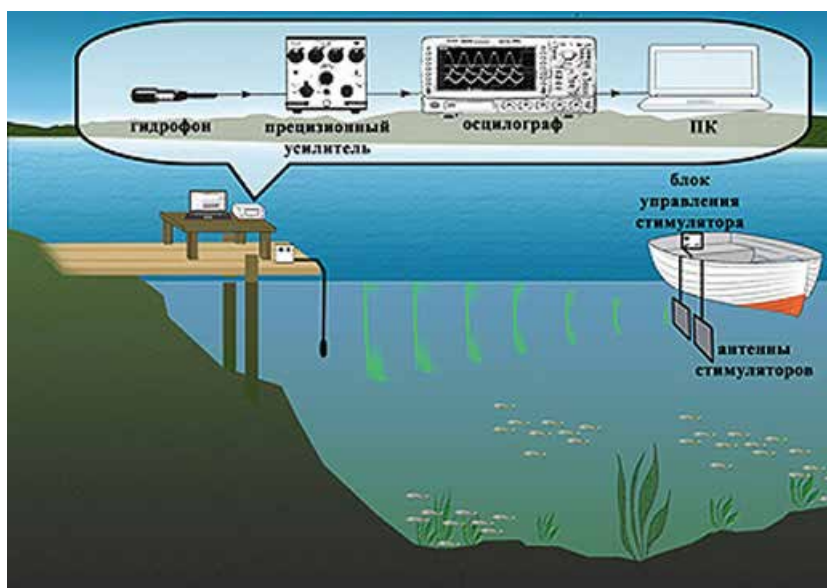


Рис. 5. Схема проведения измерений характеристик гидроакустического стимулятор «Сигнал-ТЗЭ» на оз. Глубокое



Рис. 6. Фрагмент проведения измерений на оз. Глубокое

где U_0 — уровень эталонного сигнала (мВ); A_s — величина записанного сигнала с гидрофона, определяемая по шкале относительных амплитуд записи в Audacity (мВ); A_0 — величина амплитуды эталонного сигнала, определяемая по записанным с генератора файлам частотой 300 Гц (мВ).

Для определения звукового давления P_s (Па), регистрируемого акустического сигнала, напряжение U_s (мВ) делят на чувствительность гидрофона M_g (мВ/Па)

$$P_s = U_s / M_g \text{ (Па)}.$$

При проведении измерений использовали гидрофон диаметром 50 мм, имеющий чувствительность 100 мкВ/Па, или 0,1 мВ/Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обработки записанных акустических эхосигналов от различных конструкций гидроакустических стимуляторов в виде графиков зависимостей амплитуд от расстояния между излучателем и гидрофоном представлены на рис. 7, 8, 9. Из-за крупного масштаба на графиках не видны отдельные импульсы посылок. Поэтому рядом показан реальный вид отдельной посылки для каждого из стимуляторов по уровню сигнала 0,3. По графикам уменьшения амплитуд в зависимости от дистанции от излучателя до гидрофона можно судить, как меняется интенсивность сигналов на разных дистанциях. Для каждого излучателя в табл. 1, 2, 3 представ-

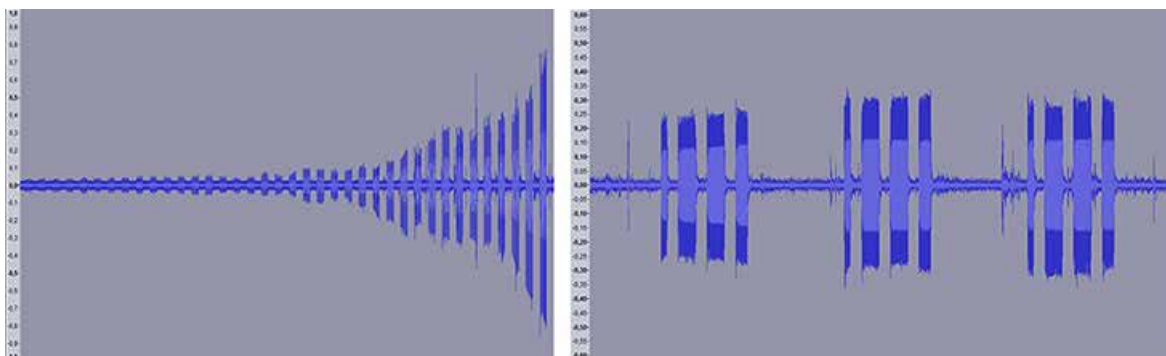


Рис. 7. Гидроакустический стимулятор «Сигнал-М». Характерный вид акустических сигналов на разных дистанциях (слева) и отдельного сигнала по уровню 0,3 на расстоянии 11 м

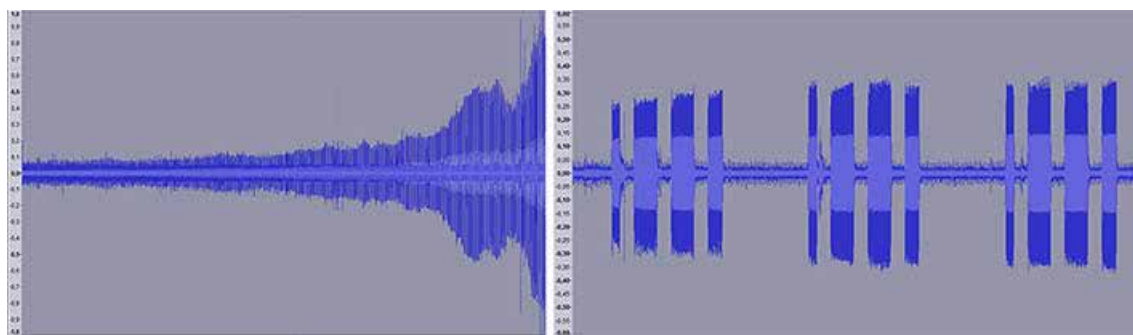


Рис. 8. Гидроакустический стимулятор «Сигнал-ТЗЭ». Характерный вид акустических сигналов на разных дистанциях (слева) и отдельного сигнала по уровню 0,3 на расстоянии 40 м

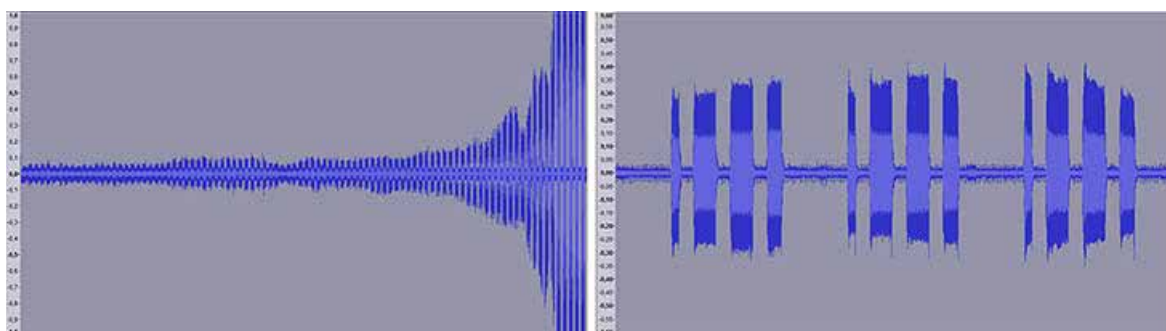


Рис. 9. Гидроакустический стимулятор «ЭМИ». Характерный вид акустических сигналов на разных дистанциях (слева) и отдельного сигнала по уровню 0,3 на расстоянии 20 м

лены результаты измерений уровня сигнала в относительных единицах, средний уровень сигнала в мВ, а также расчётные значения акустического давления в Па (паскалях) на разных дистанциях между излучателем и гидрофоном и при разных значениях усиления электронных блоков стимуляторов.

Как показал спектральный анализ при распространении акустического сигнала в водной среде, обладающей нелинейностью своих упругих характеристик, происходит искажение акустического сигнала и размножение его высших гармоник. Причём, этот процесс в значительной степени зависит от гидрологии дна,

Таблица 1. Результаты измерения акустического давления посылок стимулятора «Сигнал-М» на разных дистанциях от гидрофона и при различных усилениях электронного блока

Дистанция между гидрофоном и излучателем, м	Усиление	Уровень сигнала	Сигнал, мВ	Давление, Па
10	5	0,33	0,264	2,64
10	4	0,325	0,26	2,6
10	3	0,296	0,237	2,37
<i>Движение излучателя к гидрофону</i>				
30	5	0,027	0,0216	0,216
22	5	0,04	0,032	0,32
20	5	0,1	0,08	0,8
15	5	0,23	0,184	1,84
10	5	0,335	0,268	2,68
5	5	0,7	0,56	5,6

Таблица 2. Результаты измерения акустического давления посылок стимулятора «Сигнал-ТЗЭ» на разных дистанциях от гидрофона и при различных усилениях электронного блока и количестве излучателей

Количество излучателей	Дистанция между гидрофоном и излучателем, м	Усиление	Уровень сигнала	Сигнал мВ	Давление Па
2	10	5	0,43	0,344	3,44
2	10	4	0,34	0,272	2,72
1	10	5	0,45	0,36	3,6
1	10	4	0,41	0,328	3,28
2	30	5	0,15	0,12	1,2
2	30	4	0,145	0,116	1,16
1	30	5	0,13	0,104	1,04
1	30	4	0,10	0,08	0,8
2	50	6	0,12	0,096	0,96
2	50	5	0,085	0,068	0,68
1	50	6	0,11	0,088	0,88
1	50	5	0,08	0,064	0,64
2	100	5	0,035	0,028	0,28
2	100	6	0,04	0,032	0,32
1	100	6	0,03	0,024	0,24

Таблица 3. Результаты измерения акустического давления посылок стимулятора «ЭМИ» на разных дистанциях от гидрофона и при различных усилениях электронного блока

Дистанция между гидрофоном и излучателем, м	Усиление	Уровень сигнала	Сигнал, мВ	Давление, Па
10	2	0,46	0,368	3,68
20	8	насыщение	–	–
20	7	насыщение	–	–
20	5	0,29	0,232	2,32
40	5	0,025	0,028	0,28
40	8	0,125	0,044	0,44
60	8	0,10	0,08	0,8
100	8	0,04	0,032	0,32
Движение излучателя к гидрофону				
100	8	0,045	0,036	0,36
60	8	0,085	0,068	0,68
30	8	0,13	0,104	1,04

насыщенности воды включениями, структуры первичного акустического поля и его уровня. На ближних дистанциях частотный диапазон представлен широким набором гармоник. По мере увеличения дистанции между излучателем и гидрофоном частотный спектр сужается, что объясняется более высоким коэффициентами затухания для высоких частот.

При работе акустического стимулятора «Сигнал-ТЗЭ» сигналы регистрировались на наибольших дистанциях в 200 м, при этом их уровень был чуть выше уровня помех. Сигналы, излучаемые акустическим стимулятором «ЭМИ», регистрировались на дистанциях до 100 м. Наихудшие показания по дальности были при работе стимулятора «Сигнал-М» — до 40 м.



Рис. 10. Мобильный гидроакустический комплекс, размещённый на лодке (А); кормовая площадка (Б)

Поскольку мобильный гидроакустический комплекс по перемещению нагульного рыбного сообщества располагался на борту моторной лодки, работа с тяжелым и габаритным стимулятором «Сигнал-ТЗЭ» была затруднительна из-за ограниченности рабочего пространства. Поэтому для проведения дальнейших работ по перемещению рыб по акватории экспериментального полигона был выбран стимулятор «ЭМИ», обладающий существенно меньшим весом и габаритами (рис. 1 Б). На лодке был смонтирован мобильный гидроакустический комплекс, включающий гидроакустический стимулятор «ЭМИ», эхолот Simrad EK-15 и кормовую площадку (рис. 10 А, Б), используемую для пищевого подкрепления условно-рефлекторного поведения рыб. Эхолот EK-15 использовался для оценки изменения численности рыб в пределах кормовой площадки в процессе проведения экспериментальных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный комплекс был использован в период с 12.07.2017 по 04.08.2017 на Вазузском водохранилище при выполнении работ по управлению поведением местного сообщества рыб, целью которых была оценка потенциала его перемещения по водоёму, и показал свою высокую эффективность.

Технология по управлению поведением рыб может быть также использована при организации устойчивых рыбных концентраций для развития рекреационного рыболовства на водоёме. В садковых хозяйствах индустриальной аквакультуры, сопровождая процесс кормления рыб в садках излучением гидроакустических сигналов, можно выработать у рыб условный рефлекс на возврат в зону кормления по

звуковому сигналу и, тем самым, снизить безвозвратные потери рыб, связанные с их уходом в открытый водоём при повреждении садков водными млекопитающими.

В заключении выражаем искреннюю благодарность научному руководителю Гидробиологической станции «Глубокое озеро» д. б. н. Коровчинскому Николаю Михайловичу за содействие и помощь, оказанную при проведении испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- Воловова Л.А., Красюк В.В. 1987. Методические рекомендации по управлению морским нагулом и отловом радужной форели при помощи гидроакустических стимулов. М.: ВНИРО. 28 с.
- Воловова Л.А. 1983. О структуре биозвуков питающейся форели // Вопросы промысловой гидроакустики. М.: ВНИРО. С. 65–71.
- Воловова Л.А., Шабалин В.Н., Питк А.А. 1986. Способ возврата рыб на локальную акваторию при их выращивании. А.с. 1261598 СССР. Открытия и изобретения № 37.
- Долгов А.Н., Максимов В.Н., Воловова Л.А., Гончаров С.М. 2017. Гидроакустический низкочастотный преобразователь. Пат. РФ № 168944. Бюл. № 7.
- McNeil W.J. 1983. World salmon ranching // Proc. Oceans' 83. San Francisco, 20 Aug.— 1 Sept. P. 880–883.
- Ishioka H., Hatakeyama I., Skaguchi S., Iajima Sh. 1986. The effect of sound stimulus on the behavioral disturbance of Red Sea bream // Bull. Nansei Reg. Fish. Res.Lab. № 20. P. 59–70.

Поступила в редакцию 04.05.2018 г.
Принята после рецензии 30.05.2017 г.

Equipment for fisheries research

**Hydroacoustic stimulator as tool in technology
of fish feeding behavior management**

S.M. Goncharov¹, V.N. Maksimov², A.N. Dolgov², Y.N. Kravchenko¹, S.B. Popov¹

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»), Moscow

² Vector Marine Electronics, Ltd («Vector»), Taganrog

Hydroacoustic stimulator is necessary technical device, defining efficiency in technology of fish feeding behavior management. This technology helps to increase pasturable and industrial fish aquaculture as well as to develop recreational fishery. This article represents various designs of hydroacoustic stimulators, developed on modern element base, with cooperation “VNIRO” and Vector Marine Electronics, Ltd (“Vector”). This article also presents results of their technical characteristics measurements in comparison with its earlier version, created by “VNIRO” scientists, that was used during works with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), conducted in the bay Tagalakht (Saaremaa Island) of the Baltic Sea. As a result of the measurements of various design stimulators range, the mobile hydroacoustic complex has been created. This technical complex was successfully used during assessment work of relocation potential of earlier trained fish community on the water area of the experimental polygon of the Vazuzsky reservoir.

Keywords: hydroacoustic stimulator, acoustic signal, pasturable and industrial fish aquaculture, fish feeding behavior management.

REFERENCES

- Volovova L.A., Krasnyuk V.V.* 1987. Metodicheskie rekomendatsii po upravleniyu morskim nagulom i otlovom raduzhnoy foreli pri pomoshchi gidroakusticheskikh stimulov [Methodical recommendations about management of sea fattening and catching of an iridescent trout by means of hydroacoustic incentives]. M.: VNIRO. S. 28.
- Volovova L.A.* 1983. O strukture biozvukov pitayushchejsya foreli [On the structure of biosounds produced by eating rainbow trout] // Voprosy promyslovoy gidroakustiki. M.: VNIRO. S. 65–71.
- Volovova L.A., Shabalin V.N., Pitk A.A.* 1986. Sposob vozvrata ryb na local'nuyu akvatoriyu pri ih vyrashchivaniy [A way of return of fishes on the localwater area at their cultivation]. A.s. 1261598 SSSR. Otkrytiya, izobreteniya № 37.
- Dolgov A.N., Maksimov V.N., Volovova L.A., Goncharov S.M.* 2017. Gidroakusticheskiy nizkochastotnyj preobrazovatel' [Hydroacoustic low-frequency transducer]. Pat. RF № 168944. Byul. № 7.
- McNeil W.J.* 1983. World salmon ranching // Proc. Oceans' 83. San Francisko, 20 Aug.— 1 Sept. P. 880–883.
- Ishioka H., Hatakeyama I., Skaguchi S., Iajima Sh.* 1986. The effect of sound stimulus on the behavioral disturbance of Red Sea bream // Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab. № 20. P. 59–70.

TABLE CAPTIONS

Table 1. Measurement results of acoustic pressure parcels of «Signal-M» stimulator at different distances from the hydrophone and at various strengthening of the electronic block.

Table 2. Measurement results of acoustic pressure parcels of «Signal-T3E» stimulator at different distances from the hydrophone and at various strengthening of the electronic block and radiators quantity.

Table 3. Measurement results of acoustic pressure parcels of «EMI» stimulator at different distances from the hydrophone and at various strengthening of the electronic block.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. «Signal-M» stimulator, containing two emitters, made of ferret salt crystal plates, connecting cable, switchboard, signals generator

Fig. 2. Small-sized electromagnetic stimulator «EMI», containing radiator with membrane made of galvanized iron, connecting cable, signals generator.

Fig. 3. «Signal-T3E» stimulator, containing two radiators with membranes made of stainless steel, connecting cable, signals generator, which has possibility of two acoustic emitters simultaneous connection, 12 Volts accumulator.

Fig. 4. Block diagram of carrying out measurements.

Fig. 5. The scheme of measuring characteristics carrying out of «Signal-T3E» hydroacoustic stimulator at the lake Glubokoe.

Fig. 6. Fragment of carrying out measurements at the lake Glubokoe.

Fig. 7. «Signal-M» hydroacoustic stimulator. Usual types of acoustic signals at different distances (at the left) and a separate signal on level 0.3 at 11 meters distance.

Fig. 8. «Signal-T3E» hydroacoustic stimulator. Usual types of acoustic signals at different distances (at the left) and a separate signal on level 0.3 at 40 meters distance.

Fig. 9. «EMI» hydroacoustic stimulator. Usual types of acoustic signals at different distances (at the left) and a separate signal on level 0.3 at 20 meters distance.

Fig. 10. Mobile hydroacoustic complex placed on the boat (A); feeding platform (B).