

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 681.883.022,621.396.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ  
ОБРАБОТКИ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В СТАНЦИИ  
ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2020 г. В. Н. Драченко<sup>а, \*</sup>, А. Н. Михнюк<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>ООО “Акустические системы калибровки Программирование”,  
ул. 5-я Магистральная 11, Москва, 123007 Россия

\*e-mail: ncvi@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 28.04.2020 г.

Рассмотрена возможность применения метода нелинейного подавления помех в приемном тракте гидролокационной станции обнаружения малоразмерных объектов. Показана эффективность такой обработки в реальных условиях.

*Ключевые слова:* гидролокация, негауссовская помеха, нелинейная обработка сигналов

DOI: 10.31857/S0320791920050032

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей гидролокационных станций (ГЛС) является обнаружение слабых эхо-сигналов на фоне помех различного типа и происхождения [1–3]. Таким образом, одним из ключевых факторов, определяющих эффективность ГЛС, является помехоустойчивость трактов приема и обработки сигналов [4–6].

Специфической особенностью условий работы гидролокационных станций, предназначенных для мониторинга акваторий вблизи объектов береговой и морской инфраструктуры с целью защиты от несанкционированного проникновения, является их расположение в прибрежных акваториях. Опыт эксплуатации таких ГЛС показывает достаточно частое наличие в принимаемых сигналах импульсных помех настолько высокого уровня, что они не могут быть полностью подавлены входными фильтрами. По всей видимости, данные помехи имеют биологическое происхождение. Рассматриваемые акватории характеризуются дном с относительно малой глубиной и плотным заселением морскими беспозвоночными. Наличие вблизи приемной антенны ГЛС этих организмов и издаваемые ими звуки, особенно в период высокой их активности, приводят к существенно ухудшению сигнально-помеховой ситуации и, соответственно, к ухудшению характеристик обнаружения.

Рассмотрим результаты работы реальной ГЛС с 64-канальной незвукопрозрачной приемной антенной в летний период в одной из бухт Амурского залива, представленные на рис. 1 и 2. На рис. 1а приведен график зависимости модуля принимаемого сигнала от номера отсчета в реализации (времени), а на рис. 1б – зависимость от номера отсчета значений самого сигнала по одному из приемных каналов. На рис. 2 представлены в увеличенном масштабе сигналы с рис. 1б на отрезках, содержащих аномальные выбросы. Здесь по оси абсцисс отложены номера отсчетов, а по оси ординат – их значения.

Как видно из приведенных графиков, помеха имеет акустическое происхождение и носит ярко выраженный импульсный характер. Помехи подобного типа характеризуются большими выбросами мгновенных значений и описываются распределениями вероятности с положительным эксцессом. Они могут быть обусловлены не только биошумами, но и другими причинами, как например, подледные шумы на Байкале [7]. Подавлению подобных негауссовских помех посвящено немало работ, в которых, в основном, рассматриваются радиочастотные тракты.

## ТЕОРИЯ

При негауссовских помехах оптимальные алгоритмы, следующие из критерия Неймана–

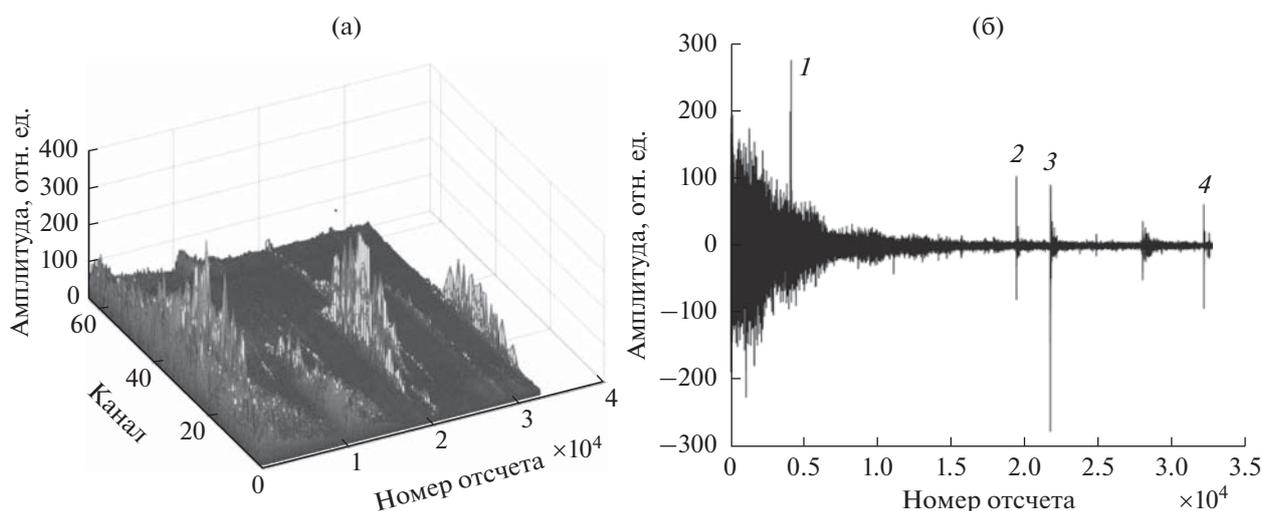


Рис. 1. (а) – Модуль сигнала на антенне, (б) – сигнал в 33 канале.

Пирсона, выражаются громоздкими вычислительными процедурами, малопригодными для технической реализации даже при известном виде этих распределений и их параметрах. Поэтому все известные исследования посвящены локально или асимптотически оптимальным методам. В нашем случае вид распределения неизвестен и оценка его параметров затруднена.

Известно [8–10], что повышение помехозащитности приемных устройств от негауссовских помех в обнаружителях слабых сигналов может достигаться применением специального нелинейного преобразования сигналов. Вид и эффективность нелинейной обработки зависят как от модели сигнала (когерентный или некогерентный), так и от вероятностных свойств помехи.

Рассмотрим упрощенную блок-схему стандартной обработки принимаемых сигналов в ГЛС до подачи их в тракт пространственной обработки на рис. 3. Здесь сигнал с приемного элемента (ПЭ) в аналоговом тракте усиливается и фильтруется полосовым фильтром (УПФ), подается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Затем цифровой сигнал подвергается дополнительной цифровой фильтрации и децимации (ЦФД) перед подачей в тракт пространственной обработки.

Известные результаты [8–12] позволяют утверждать, что общая схема обработки в случае присутствия негауссовских помех должна содержать нелинейный безынерционный элемент (НБЭ). Алгоритм нелинейной безынерционной обработки

сигнала, предназначенный для подавления помех в тракте обработки, обоснован в [8] и имеет вид

$$f_{0p}(x) = \int_0^x \frac{d(Ag_0(A))}{\sqrt{x^2 - A^2}}, \quad x \geq 0,$$

$$g_0(A) = -\frac{d}{dA} \ln \frac{W_A(A)}{A},$$

$$f_{0p}(-x) = -f_{0p}(x),$$

где  $W_A(A)$  – плотность вероятности огибающей помеховой составляющей в принимаемом сигнале. Данная характеристика является основной при описании помехового колебания.

Априорная неопределенность статистических и энергетических характеристик негауссовских помех обуславливает актуальность задачи поиска квазиоптимальных методов и реализующих их устройств нелинейной обработки.

Рассмотрим по существу влияние НБЭ. Механизм ослабления помех за счет нелинейного преобразования имеет следующее объяснение [9]. Ослабление помех осуществляется вследствие неравномерной передачи разных участков амплитудного диапазона. Участки, на которые выпадают значения смеси сигнала с помехой преимущественно из-за действия помех, передаются с малым коэффициентом передачи, участки, где наличие сигнала проявляются наиболее заметно, имеют высокий коэффициент передачи.

Рассмотрим мгновенные значения принимаемой реализации на выходе одного из приемников антенной решетки в фиксированный момент времени в зависимости от номера цикла локации. Под циклом локации подразумевается один цикл

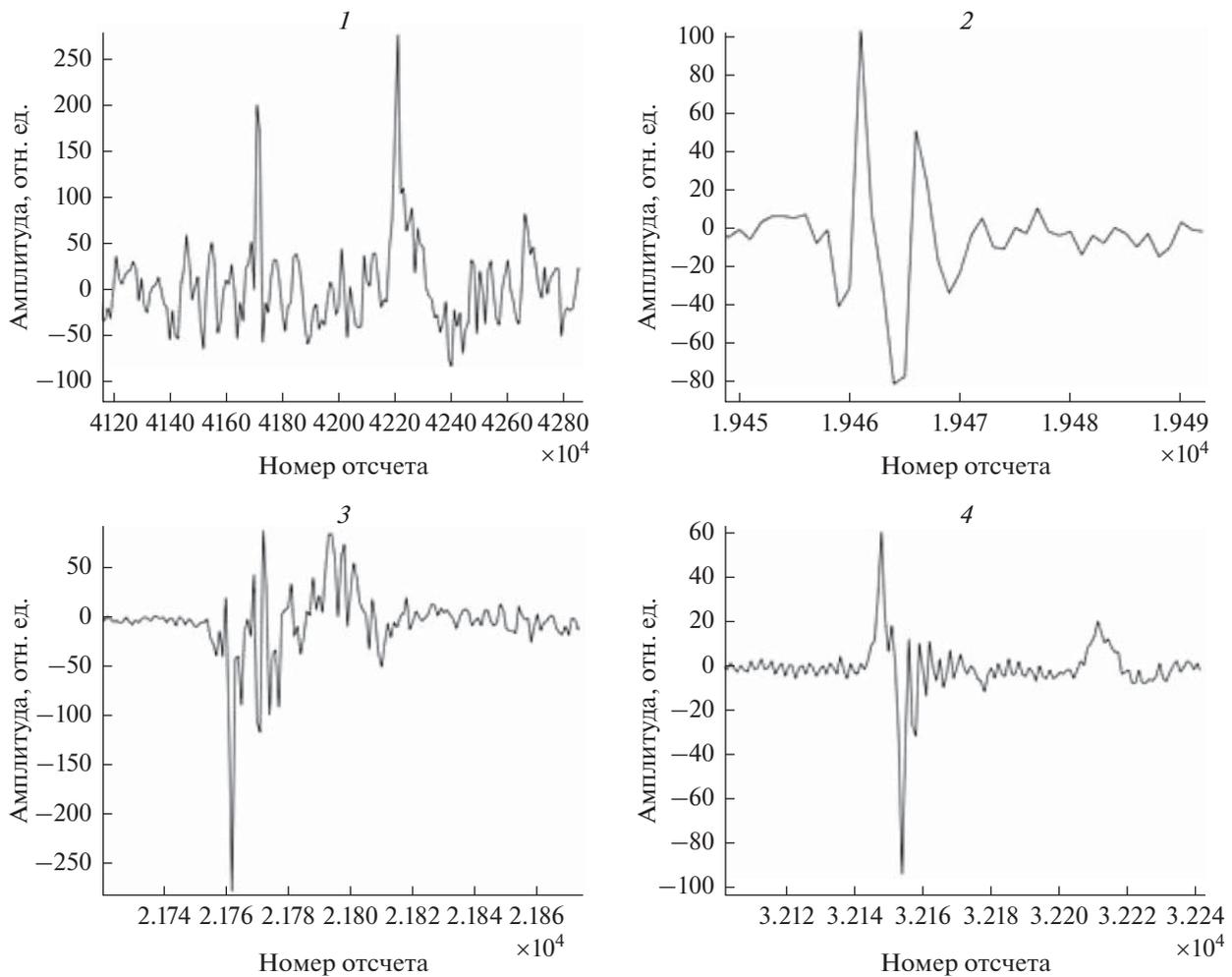


Рис. 2. Сигналы в моменты 1–4 с рис. 1б.

работы ГЛС, включающий в себя режим излучения зондирующего сигнала, режим приема и обработки эхосигналов и, в некоторых случаях, ждущий режим. На рис. 4 изображена данная зависимость для моментов времени, соответствующих дистанциям 200 м (рис. 4а) и 300 м (рис. 4б). Из рис. 4 видно, что интенсивность помехи в моменты времени, соответствующие дистанциям 200 м, больше. Это обусловлено спаданием реверберации с увеличением дистанции. На рис. 4а присутствуют также два аномальных выброса, обусловленных импульсной помехой.

На рис. 5 и 6 приведены гистограммы, полученные для реализаций, изображенных на рис. 4. Для наглядности приведены плотности соответствующих нормальных распределений и отмечены стрелками аномальные выбросы. Из приведенных графиков следует, что в отсутствие импульсных помех смесь шумов моря с реверберацией распределена, как и следовало ожидать, по нор-

мальному закону с нулевым математическим ожиданием и зависящим от дистанции среднеквадратичным отклонением (СКО).

В условиях отсутствия априорной информации о параметрах импульсной помехи, исходя из выше сказанного, можно предположить, что достаточно эффективным в случае помех рассматриваемого типа может оказаться НБЭ простейшего типа в виде идеального ограничителя, амплитудная характеристика которого приведена на рис. 7. Здесь пороговое значение  $U_{\text{п}} = \alpha\sigma$ , выбирается пропорциональным текущей для данного момента времени оценке СКО  $\sigma$ , реализации (оценивается адаптивно), а значение коэффициента

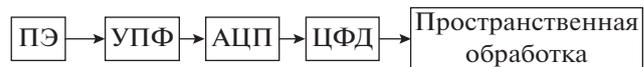


Рис. 3. Блок-схема стандартного тракта обработки.

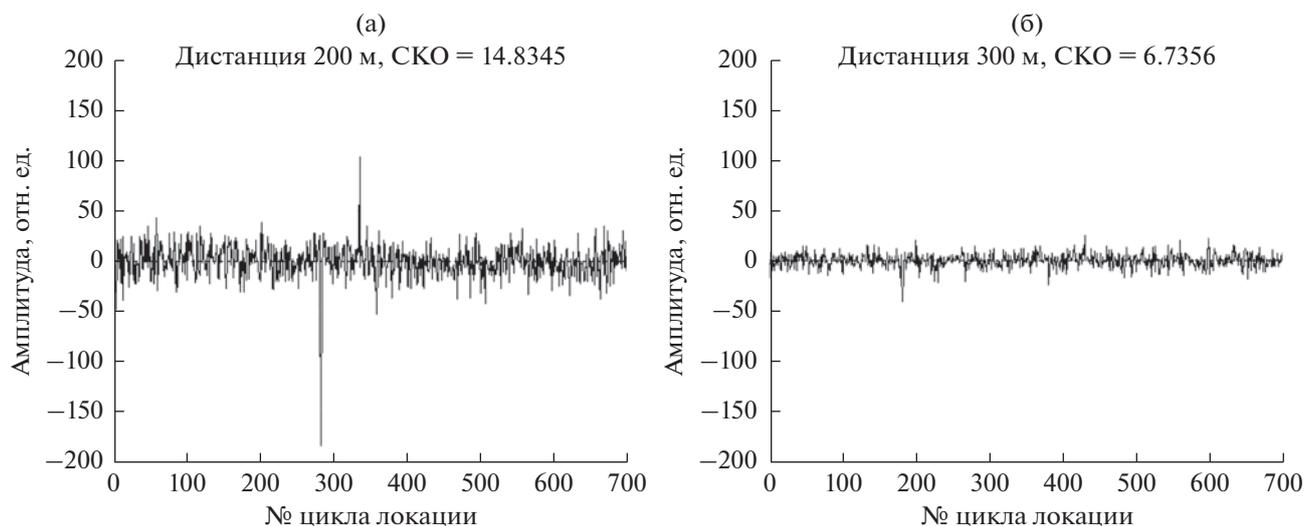


Рис. 4. Зависимость от номера цикла локации мгновенных значений, соответствующих фиксированным дистанциям в принимаемых сигналах.

пропорциональности  $\alpha$  лежит в пределах от 2 до 3 и определяет относительное количество ограничиваемых значений в принятой реализации в отсутствие импульсной помехи:

$$N_{\text{lim}}/N = 2(1 - \Phi(\alpha)),$$

где  $N_{\text{lim}}$  — количество ограничиваемых значений;  $N$  — количество отсчетов принятой реализации;  $\Phi(\alpha)$  — функция распределения стандартного нормального распределения. Конкретная величина коэффициента пропорциональности уточняется при настройке после установки ГЛС в акватории.

В случае реально существующей ГЛС, НБЭ удобнее включать в тракт цифровой обработки как на рис. 8 (выделен жирным). Это можно реализовать программным образом, без изменений аппаратной части ГЛС.

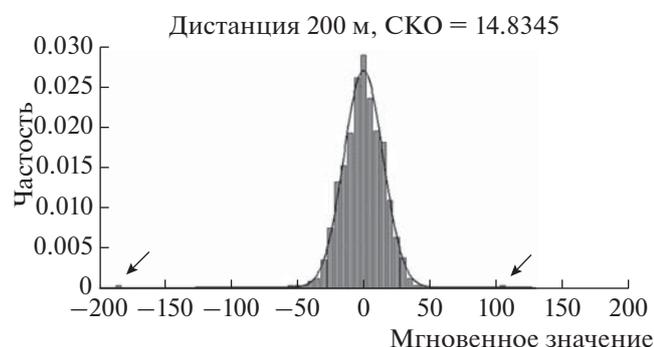


Рис. 5. Гистограмма мгновенных значений, соответствующих дистанции 200 м.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Ниже рассмотрены результаты экспериментальной проверки эффективности использования НБЭ предлагаемого типа для реальной ГЛС обнаружения малоразмерных объектов.

Эффективность включения в тракт обработки НБЭ проверялась на окончательных результатах обработки в реальном эксперименте при буксировке в зоне обзора станции полой сферы — имитатора подводной цели. В ходе эксперимента производилась регистрация цифрового потока сигналов (на выходе ЦФД), принимаемых многоэлементной приемной антенной ГЛС.

Камеральная обработка проводилась в двух режимах:

1) цифровой поток обрабатывался в штатном режиме (по схеме на рис. 3).

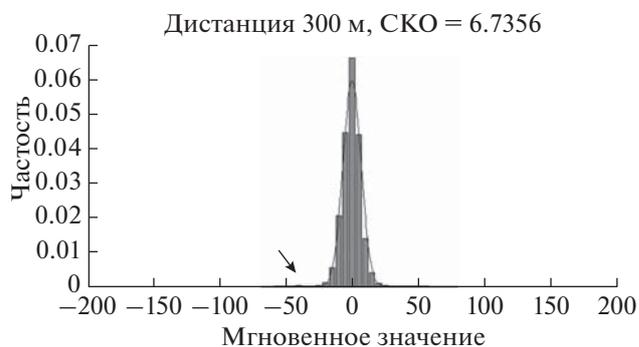


Рис. 6. Гистограмма мгновенных значений, соответствующих дистанции 300 м.

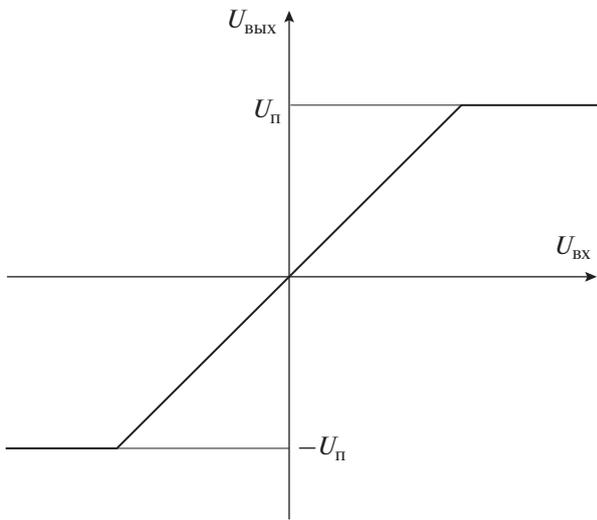


Рис. 7. Амплитудная характеристика НБЭ.



Рис. 8. Блок-схема тракта обработки с НБЭ.

2) цифровой поток перед поступлением на пространственную обработку проходил через НБЭ в виде идеального порогового ограничителя (рис. 8) при значении  $\alpha = 3$ .

Все остальные параметры обработки в обоих режимах были идентичны.

Результаты обработки представлены на рис. 9. На рис. 9а — траектория движения обнаруженной цели, полученная в штатном режиме, а на рис. 9б —

та же траектория при применении нелинейной обработки. Две окружности на рис. 9 представляют собой мертвую зону ГЛС и границу зоны обзора. Жирными линиями нарисованы траектории обнаруженных целей. Серым цветом обозначена обнаруживаемая в данный момент трасса, а черным — обнаруженные, но снятые с сопровождения (потерянные) трассы.

Шкала дистанций по оси  $Ox$  обозначена в метрах. В нижней части рисунка приведены результаты текущей оценки параметров обнаруживаемой на данном этапе цели: Текущий номер цели; Дистанция, м; Пеленг, град; Курс, град; Текущая скорость, м/с; Средняя по трассе скорость, м/с; Время сопровождения трассы, с; Среднее по трассе отношение сигнал-помеха.

Как видно из приведенных графиков, применение нелинейной обработки существенно улучшило конечный результат. Если в первом случае траектория цели три раза сбрасывалась с сопровождения, то во втором цель удерживается на всем протяжении галса до границы зоны обзора. Траектория, полученная с применением НБЭ, более гладкая, без “рысканий”, обусловленных захватом ложных отражений. Последнее наглядно иллюстрируют значения текущих курса и скорости цели на момент окончания наблюдений. Значение среднего по трассе отношения сигнал-помеха значительно больше при применении НБЭ.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, экспериментальная проверка возможности включения в тракт обработки нелинейного элемента, не требующего для реализации существенных затрат, подтвердила его высокую

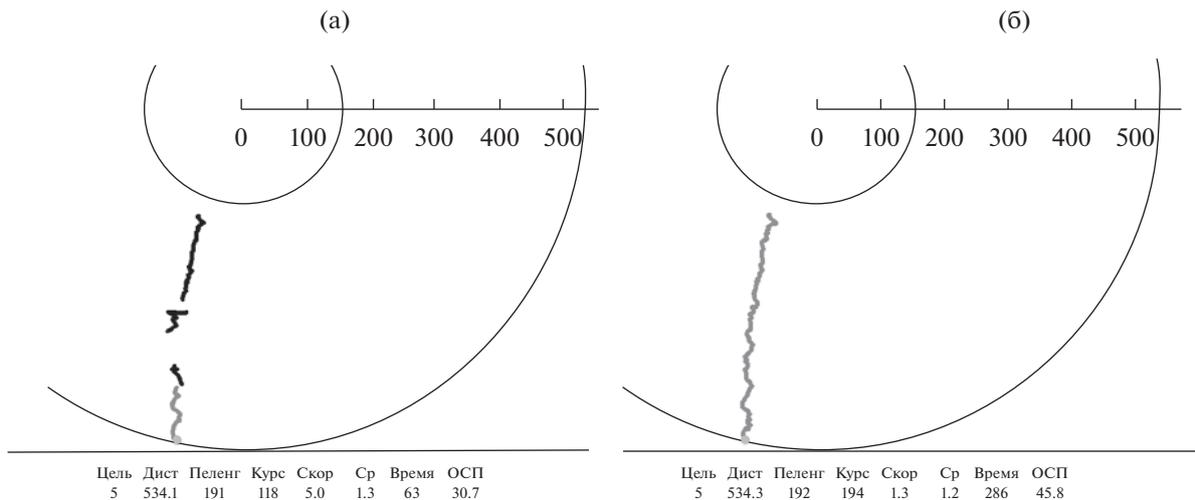


Рис. 9. Зона обзора ГЛС с результатами траекторного анализа: (а) — без НБЭ, (б) — с НБЭ.

эффективность в реальных условиях эксплуатации ГЛС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рутенко А.Н., Гриценко В.А.* Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
2. *Салин М.Б., Потапов О.А., Стуленков А.В., Разумов Д.Д.* Исследование распределения реверберационной помехи по частотам Доплера в бистатическом эксперименте в глубоком море // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 1. С. 34–41.
3. *Завольский Н.А., Раевский М.А.* Горизонтальная анизотропия динамических шумов в глубоком и мелком море // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 2. С. 197–202.
4. *Калёнов Е.Н.* Помехоустойчивость системы обнаружения при оптимальной пространственной фильтрации и при использовании компенсатора помех // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 3. С. 379–388.
5. *Малышкин Г.С.* Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 196–208.
6. *Малышкин Г.С.* Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 3. С. 284–299.
7. *Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белолопников И.А. и др.* Высокочастотные акустические шумы озера Байкал // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 581–591.
8. *Валеев В.Г., Гонопольский В.Б.* Метод амплитудного подавления негауссовских помех // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 11. С. 2301–2307.
9. *Валеев В.Г.* Обнаружение сигналов в негауссовских помехах // В кн.: Теория обнаружения сигналов / под ред. *Бакута П.А.* М.: Радио и связь. 1984. С. 266–325.
10. *Валеев В.Г., Корнилов И.Н.* Нелинейная обработка сигналов для подавления помех в приемном тракте радиоэлектронных систем // Радиотехника. 2010. № 6. С. 37–42.
11. *Валеев В.Г., Данилов В.А.* Оптимальное обнаружение сигналов на фоне коррелированных радиопомех // Известия ВУЗов. Радиотехника. 1991. № 7. С. 30–34.
12. *Данилов В.А., Данилова Л.В.* Амплитудные характеристики нелинейных преобразователей для подавления негауссовских узкополосных помех // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2015. № 1. С. 119–122.