ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО. АКУСТИКА

УДК 551.465

Е.Н. Бакланов[1], М.В. Мироненко [2], П.А. Стародубцев [1,3], Е.П. Стародубцев [3]
[1] Дальневосточный государственный технических рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б
[2] Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25
[3] Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

ГОРИЗОНТАЛЬНО РАЗВИТАЯ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ И МОРСКОЙ СРЕДЫ

Представлены современные теоретические разработки и экспериментальные исследования использования радиогидроакустических систем в параметрических системах контроля, обеспечивающих мониторинг характеристик гидрофизических и геофизических полей, формируемых техногенными и естественными источниками, сейсмическими процессами и опасными явлениями (например, внутренними волнами, сильными землетрясениями или цунами) на широкомасштабной морской акватории.

***Ключевые слова**: мониторинг акватории, гидролокация, просветная гидроакустика, внутренние волны, поверхностные волны.*

E.N. Baklanov, M.V. Mironenko, P.A. Starodubtcev, E.P. Starodubtcev

HORIZONTALLY DEVELOPED RADIOHYDROACOUSTIC SYSTEM OF MO-NITORING OF HYDROPHYSICAL AND GEOPHYSICAL FIELDS OF OBJECTS AND MARINE ENVIRONMENT

The article presents modern theoretical developments and experimental studies of use of radiohydroacoustic systems in parametric control systems that provide monitoring of the characteristics of hydrophysical and geophysical fields formed by technogenic and natural sources, seismic processes and hazardous phenomena (for example, internal waves, strong earthquakes or tsunamis) on a large-scale marine area.

***Key words**: water area monitoring, sonar, translucent hydro-acoustics, internal waves, surface waves.*

Введение

В настоящее время специалистам в области мониторинга известен способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде, осуществляемый системой, включающей в себя рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки среды с измеряемыми информационными сигналами, размещенные в среде излучающий и приемный акустические преобразователи, соединенные с ними тракт формирования и усиления излучаемых сигналов, а также тракт приема, обработки, выделения и регистрации принимаемых информационных сигналов. Недостатком указанной системы являются ограниченная дальность параметрического приема ин-

формационных волн, составляющая единицы километров, что особенно проявляется в звуковом и инфразвуковом диапазонах частот [1].

Основная часть

Для устранения данного недостатка авторами статьи предлагается свой вариант, основанный на разработке просветной параметрической системы мониторинга как горизонтально развитой мультистатической, обеспечивающей дальний параметрический прием и измерение характеристик гидрофизических и геофизических полей технических и естественных источников и опасных явлений на широкомасштабной акватории, а также увеличение информационной емкости измерительной системы в целом.

Недостаток существующего подхода решается тем, что в гидроакустической системе параметрического приема волн различной физической природы в морской среде, включающей рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных волн, накачки среды с измеряемыми информационными сигналами дополняют тремя излучающими преобразователями и тремя приёмными блоками, которые объединены в горизонтально расположенные треугольники с вершинами, направленными противоположно излучающим преобразователям [2]. При этом приемный тракт системы дополнительно содержит три линии корреляционного и взаимно корреляционного анализа принимаемых сигналов, которые вместе с линией узкополосного спектрального анализа подключены к приемным блокам измерительной системы через общий блок переключения и коммутации принимаемых сигналов и каналы радиосвязи. Сам приемный тракт системы снабжен дополнительным блоком переключения измеряемой информации, который расположен между выходами линий корреляционного анализа и входом линии спектрального анализа. Дополнительно все линии корреляционного и взаимно корреляционного анализа измерительной системы включены последовательно с блоком двухканального широкополосного усиления, двухканального измерения функций их корреляции, измерения функции их взаимной корреляции, блоком многофункционального анализа (ЭВМ) и общим для всех трех линий блоком регистрации измеряемой информации. Выход ЭВМ через радиоблок соединен с информационно-аналитическим центром системы мониторинга, содержащим последовательно соединенные – приемный радиоблок, блок системного анализа и передающий радиоблок, выход которого по радиоканалу соединен с блоком формирования излучаемых сигналов.

Такая установка способствует оптимальному излучению, распространению и приему просветных сигналов в условиях взаимодействия протяженного гидроакустического канала распространения волн с переменными гидрофизическими полями среды в пределах границ акватории и обеспечивает формирование широкомасштабной и мультистатической системы мониторинга как единой параметрической антенны, а также возможность ее эффективной реализации в задачах мониторинга информационных полей, измерения их спектральных характеристик, определения места источников их формирования на широкомасштабной акватории.

Большой масштаб дальности параметрического приема волн обеспечивается накачкой среды слабозатухающими низкочастотными акустическими сигналами стабильной частоты в диапазоне десятки–сотни герц. Возможность дальнего параметрического приема информационных волн звукового и инфразвукового диапазонов частот достигается за счет формирования протяженного объема взаимодействия волн (пространственной параметрической антенны) [3].

За счет фазового приема и обработки просветных сигналов с пространственно-разнесенных приемных блоков устраняется низкая помехоустойчивость приема и выделе-

ния информационных волн в условиях протяженного гидроакустического канала с переменными характеристиками среды и границ.

Многоканальный и многофункциональный прием, обработка и анализ принимаемых информационных сигналов искусственных и естественных источников, процессов и явлений в широком диапазоне частот существенно расширяют информационные возможности системы мониторинга и ее практическую значимость.

На рис. 1 представлена функциональная схема просветной радиогидроакустической системы мониторинга гидрофизических и геофизических полей объектов и среды.

Для реализации просветной радиогидроакустической системы формируют и применяют аппаратный комплекс, представленный на рис. 1, включающий излучающий и приемные тракты, а также их подводные блоки.

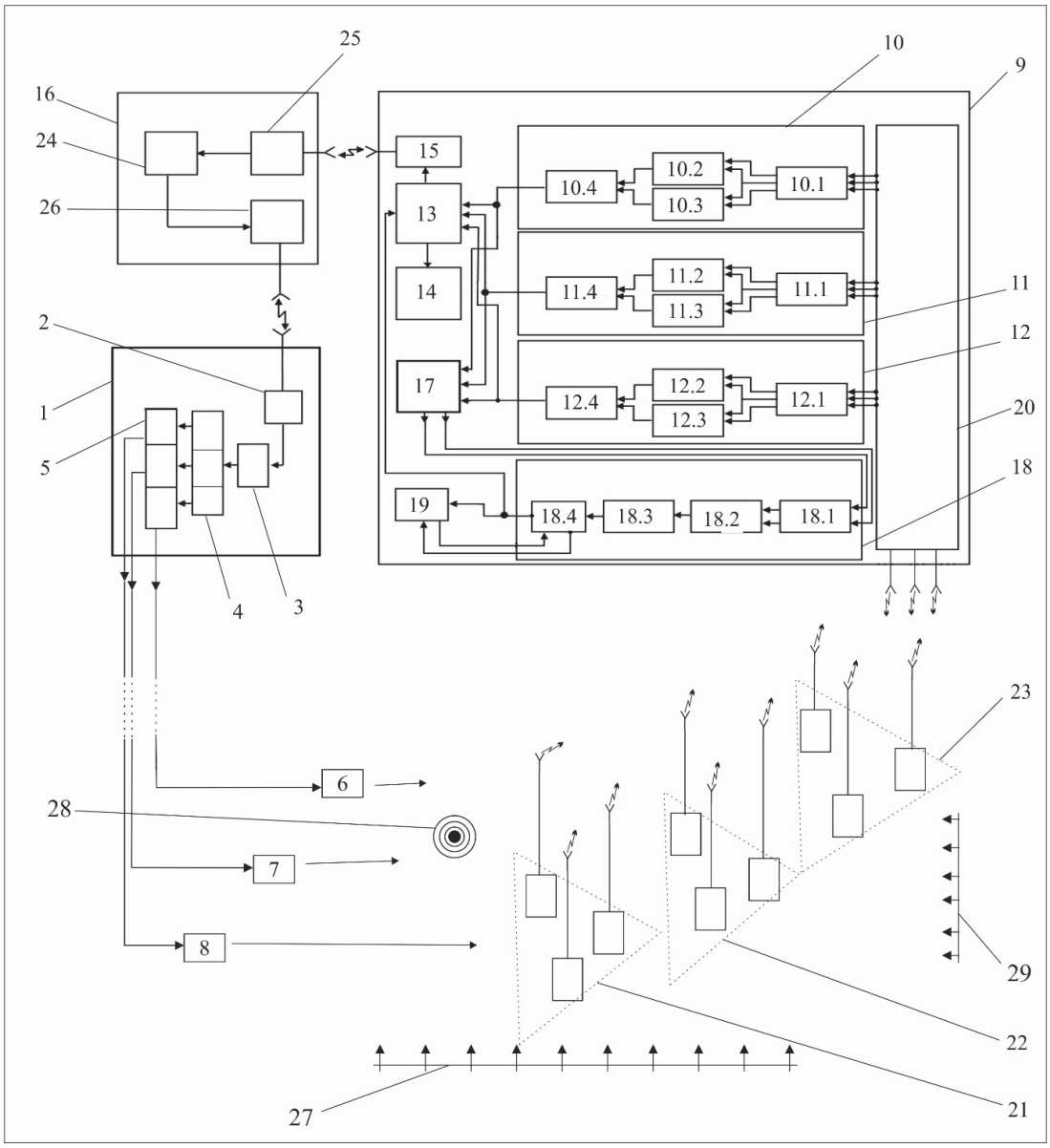

Рис. 1. Горизонтально развитая радиогидроакустическая система мониторинга гидрофизических и геофизических полей объектов и морской среды

Fig. 1. Horizontally developed radio-hydroacoustic monitoring system for hydrophysical and geophysical fields of objects and the marine environment

Излучающий тракт 1 содержит последовательно соединенные модули: приёмный радиоблок 2, формирователь низкочастотных сигналов стабилизированной частоты 3, трехканальный усилитель мощности сигналов 4, трехканальный блок согласования 5 выходов усилителя с подводными силовыми кабелями и далее с тремя подводными излучателями просветных сигналов 6, 7, 8 [4].

Приемный тракт 9 сформирован как многоканальный и состоит из трех линий корреляционного и взаимно корреляционного анализа 10, 11, 12, каждая из которых включает последовательно соединенные широкополосные усилители 10.1, 11.1, 12.1, блоки измерения функций корреляции информационных сигналов между средним и крайним одиночными приемниками 10.2, 10.3, 11.2, 11.3, 12.2, 12.3 и блоки измерения функции взаимной корреляции 10.4, 11.4, 12.4, выходы которых соединены с входами блока анализа комплексной информации 13 (ЭВМ), выход которого соединен с регистратором измеряемой информации 14, а также с радиоблоком передачи измеряемой информации 15 в информационно-аналитический центр 16. Приемный тракт снабжен блоком переключения линий корреляционного анализа 17, обеспечивающим выборочное измерение узкополосных спектров информационных волн со всех приемных блоков системы, который включен между выходами линий корреляционного анализа и входом линии спектрального анализа 18, включающего последовательно соединенные двухканальный широкополосный усилитель 18.1, блок измерения сигналов разности фаз 18.2, преобразователь временного масштаба сигналов в высокочастотную область 18.3, узкополосной анализатор спектров 18.4 и функционально связанный с ним регистратор (рекордером) выделяемых информационных сигналов 19, а также с входами блока анализа комплексной информации (ЭВМ) 13 [5].

Три линии корреляционного и взаимно корреляционного анализа 10, 11, 12 через общий блок коммутации и переключения принимаемых сигналов 20 соединены с тремя подводными приемными блоками 21, 22, 23, каждый из которых включает по три преобразователя (гидрофона), объединенные в горизонтально расположенные треугольники с вершинами, направленными противоположно излучающим преобразователям.

Информационно-аналитический центр 16 системы мониторинга включает блок системного анализа измеряемой информации 24, соединенный с выходом приемного радиоблока 25 и входом передающего радиоблока 26, а его выход по радиоканалу через приемный радиоблок 2 – с блоком формирования просветных сигналов 3 излучающего тракта 1 системы мониторинга. Кроме того, на схеме обозначены контролируемые сигналы среды: источников геофизических волн 27, источников гидрофизических волн 28, береговых источников 29.

Система работает следующим образом. Подводные излучатели 6, 7, 8 и приемные блоки 21, 22, 23 (не менее трех) горизонтально разносят по противоположным границам свалов глубин обследуемой акватории на необходимое расстояние (десятки – сотни километров) с учетом закономерностей распространения волн в протяженном гидроакустическом канале и раскрепляют их поверхностными радиобуями и донными якорями, что обеспечивает оптимальное распространение просветных сигналов и акустическую подсветку среды [6]. При этом гидрофоны приемных блоков в горизонтальной плоскости разносятся на расстояния не менее 100 м, что обеспечивает возможность использования корреляционных характеристик просветных сигналов в горизонтальной плоскости среды и помехоустойчивое выполнение мониторинга информационных полей при проведении фазовой обработки пространственно-разнесенных просветных сигналов.

Из излучающего тракта 1 подают эталонные сигналы на подводные излучатели 6, 7, 8, которые излучают в контролируемую морскую среду низкочастотные просветные акустические сигналы стабильной частоты. Под действием этих сигналов в толще воды формируется протяженная область возбуждения физических параметров морской среды, которая

выступает в качестве объемной бестелесной антенны. Контролируемые сигналы среды (источников геофизических волн 27, источников гидрофизических волн 28, береговых источников 29) взаимодействуют с этой антенной, модулируя ее сигналы своими параметрами, и совместно формируют общую антенну, содержащую большой спектр параметров исследуемой акватории, что дает возможность получить более емкую характеристику контролируемой среды [7].

Результирующие колебания поступают на приёмный тракт 9, где через блок переключения и коммутации принимаемых сигналов 20 подаются на три линии корреляционного и взаимно корреляционного анализа и одну линию спектрального анализа. В линиях корреляционного анализа происходит широкополосное усиление сигналов, измерение разности фаз сигналов, поступивших с горизонтально разнесённых приёмников, преобразование временного масштаба измеренных сигналов в высокочастотную область, узкополосный спектральный анализ и регистрация измеряемых спектров на общем для трёх линий блоке регистрации 14. После комплексного анализа полученной информации (блок 13) данные поступают на радиоблок передачи 15, откуда по радиоканалу – в информационно-аналитический центр 16, где с использованием ЭВМ 24 определяют принадлежность измеряемых волн к источникам их формирования и места их проявления на широкомасштабной акватории, а также вырабатывают управляющие сигналы (команды) для подстройки работы излучающего тракта 1 в процессе длительного мониторинга.

На рис. 2 представлена качественная картина пространственной структуры зоны Френеля между точками излучения и приема просветных акустических волн как рабочей зоны нелинейного взаимодействия просветной и измеряемых полей (параметрической антенны бегущей волны).

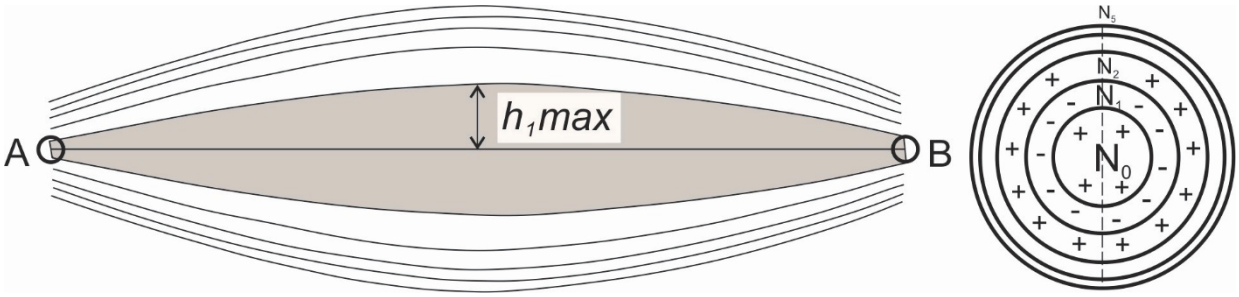

Рис. 2. Качественная картина пространственной структуры зоны Френеля между точками излучения и приема просветных акустических волн

Fig. 2. A qualitative picture of the spatial structure of the Fresnel zone between the radiation points and the reception of luminescent acoustic waves

Результаты морских испытаний предлагаемой системы представлены на рис. 3–7. Они проводились на стационарных и мобильных гидроакустических трассах протяженностью десятки–сотни километров на акваториях дальневосточных морей. Просветные гидроакустические сигналы стабилизированной частоты около 400 Гц излучались подводным маяком наведения (ПЗМ-400), а также забортным излучателем с использованием блока излучателей на частотах 100, 230, 400 и 1000 Гц. В морской части системы мониторинга использовалась донная база с ненаправленными пространственно разнесенными на 200 м и на 2 000 м приемными блоками. Излучающая и приемная базы посредством морских кабелей соединялись с береговыми лабораториями. В качестве источников информационных полей использовались морские суда, которые маневрировали и многократно пересекали просветные акустические трассы, а также сигналы предвестников сильных землетрясений, зарождающихся в районе Курильской островной гряды. На рис. 3 показан узкополосный

спектр гидрофизического поля морского объекта, зарегистрированного на просветной трассе протяженностью 20 км [8].

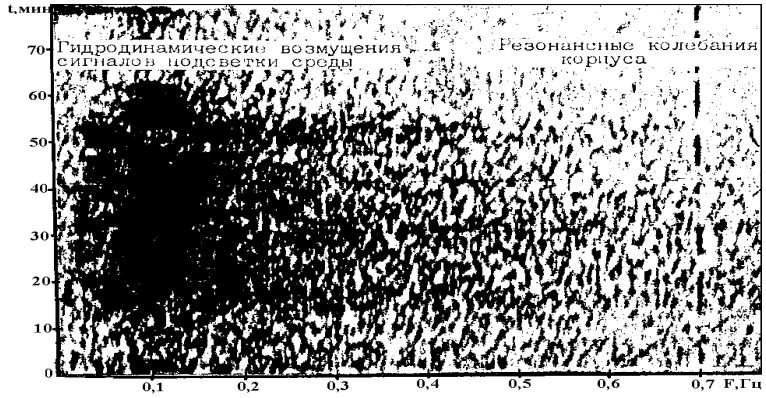

Рис. 3. Узкополосный спектр гидрофизического поля морского объекта
Fig. 3. Narrow-band spectrum of a hydrophysical field of a marine object

На рис. 4 представлена спектрограмма гидродинамических волн, сформированных синоптическими процессами (за время полного прохождения циклона на просветной трассе 345 км).

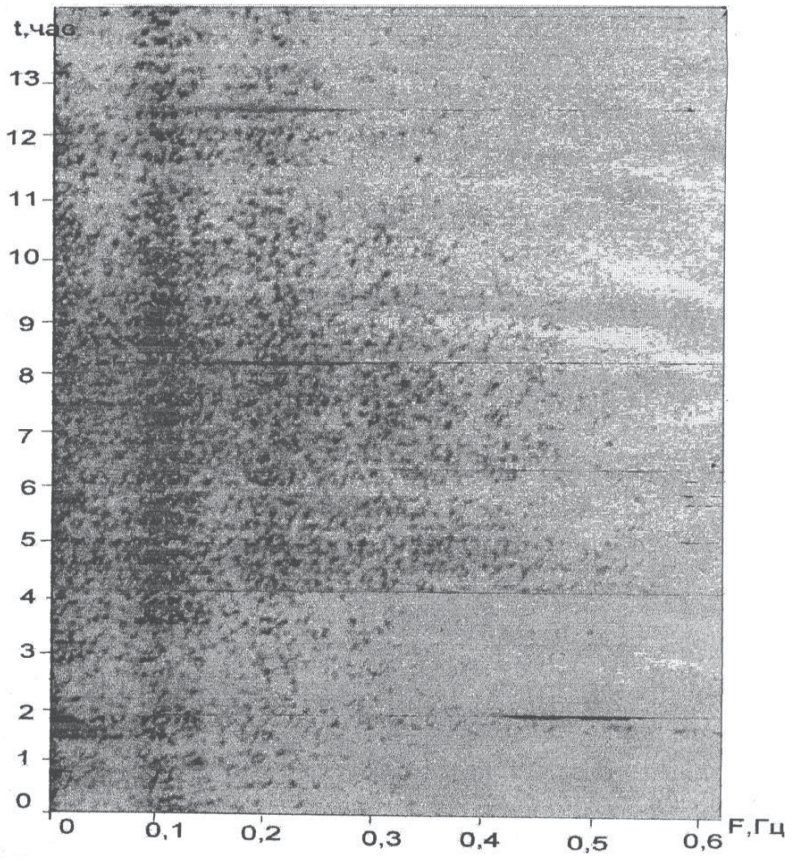

Рис. 4. Спектрограмма гидродинамических волн, сформированных синоптическими процессами
Fig. 4. Spectrogram of hydrodynamic waves formed by synoptic processes

На рис. 5 приведена спектрограмма гидрофизического поля, формируемого береговыми источниками; общая протяженность просветной трассы (о. Сахалин–побережье Приморья) составляла более 300 км [9].

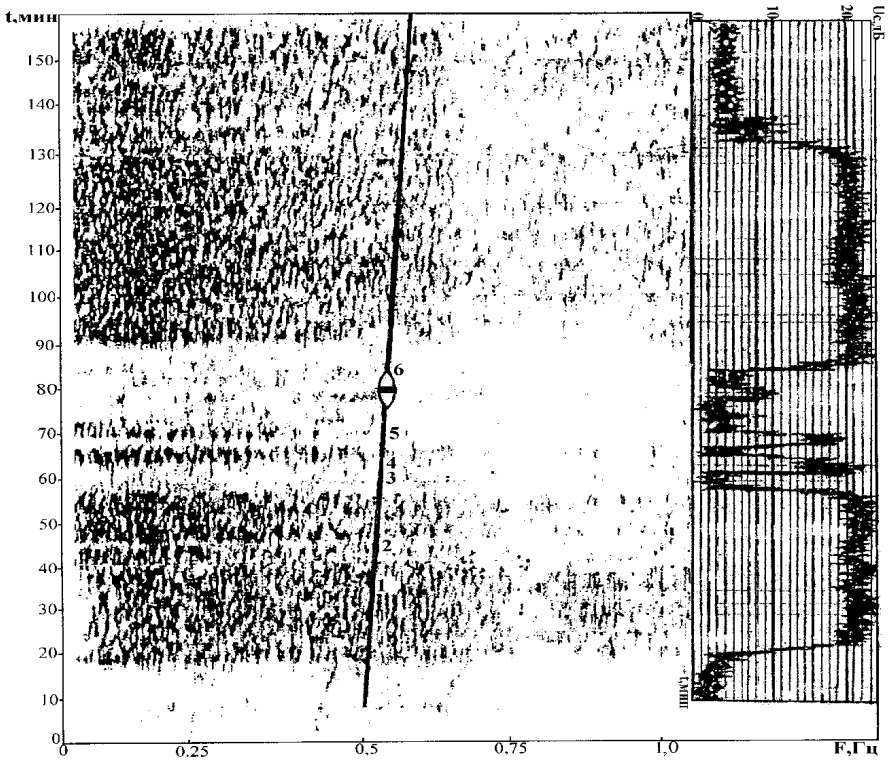

Рис. 5. Спектрограмма гидрофизического поля, формируемого береговыми источниками
Fig. 5. Spectrogram of a hydrophysical field formed by coastal sources

На рис. 6 приведена спектрограмма сейсмических волн, зарождающихся в районе Курильской гряды; прием акустических сигналов проводился на станции мыса Анива о. Сахалин, расстояние около 500 км.

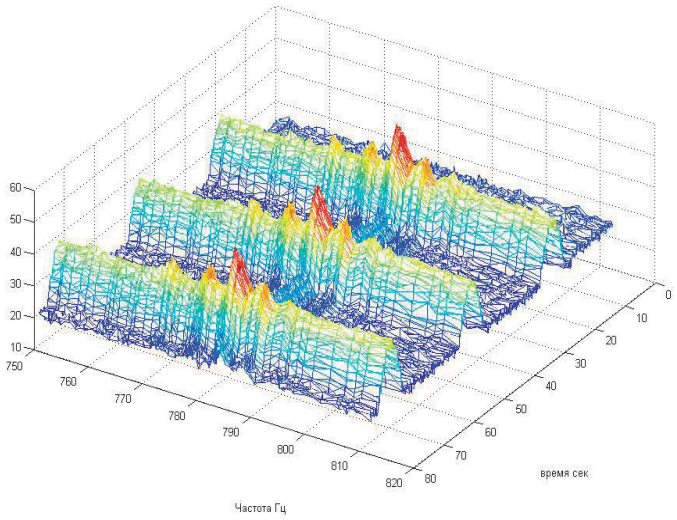

Рис. 6. Спектрограмма сейсмических волн, зарождающихся в районе Курильской гряды
Fig. 6. Spectrogram of seismic waves originating in the area of the Kuril chain

На рис. 7 приведена спектрограмма волн сейсмического фона, зарождающихся в Охотском море [10].

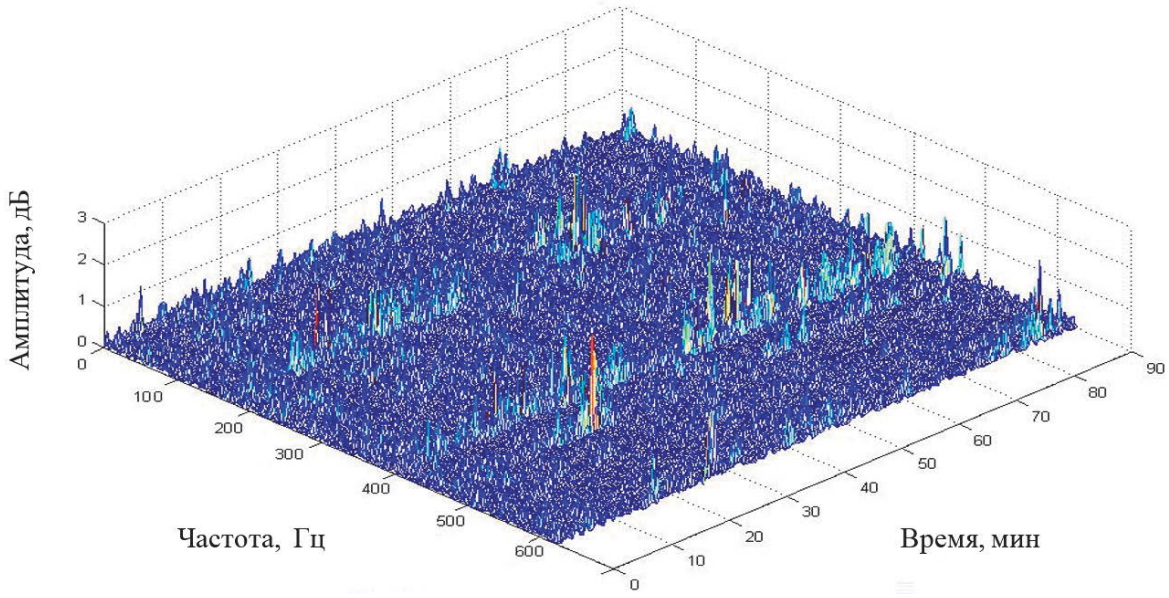

Рис. 7. Спектрограмма волн сейсмического фона, зарождающихся в Охотском море
Fig. 7. Spectrogram of waves of the seismic background originating in the Sea of Okhotsk

Заключение

Таким образом, параметрический прием нелинейно преобразованных просветных волн пространственно-разнесенными приемниками позволяет сформировать и применить горизонтальную просветную гидроакустическую систему как мультистатическую, обеспечивающую мониторинг гидрофизических и геофизических полей источников и явлений на протяженной и горизонтально развитой акватории. Фазовая и корреляционная обработка принимаемых сигналов, обеспечивающая дальний помехоустойчивый прием просветных волн, узкополосный спектральный анализ и выделение из них информационных полей как волн «малых амплитуд», а также определение направлений и координат источников их формирования на горизонтально развитой акватории обеспечивает оперативный анализ комплексной информации и формирование сигналов для корректуры и управления работой измерительной системы в соответствии с изменяющимися условиями и задачами длительного мониторинга измеряемых информационных полей на широкомасштабной акватории [11–12].

Список литературы

1. Стародубцев, П.А. Аттрактно-фрактальная технология дистанционного мониторинга закрытых бухт / П.А. Стародубцев, Н.Л. Халаев // Наукоемкие технологии. – 2012. – Т.13, № 1. – С. 36–41.

2. Стародубцев, П.А.Закономерность формирования интерференционной структуры акустических волн, рассеянных морскими объектами / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, Е.П. Стародубцев, А.М. Василенко, В.Е. Димидов // Двойные технологии. – 2012. – № 2. – С. 78–84.

3. Стародубцев, П.А. Просветная система мониторинга гидрофизических полей морской среды как низкочастотная многолучевая параметрическая антенна / П.А. Стародуб-

цев, А.М. Василенко, М.В. Мироненко // Датчики и системы. – М.: Изд-во «Сендидат-Плюс», 2013. – № 12(175). –С.41–43.

4. Стародубцев, П.А. Гидроакустическая мультистатическая схема дальнего приема сигналов «малых амплитуд» от сейсмических и синоптических процессов / П.А. Стародубцев, А.П. Шевченко, Е.Н. Бакланов // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. – Т. 33. – С. 24–34.

5. Стародубцев, П.А. Организационно-технологические и технические особенности создания Дальневосточной системы освещения и мониторинга морской обстановки / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, И.Е. Волков // Вестн. Академии военных наук. – 2014. – № 4(49). – С.35–39.

6. Стародубцев, П.А. Мультистатическая схема как структурная основа формирования Дальневосточной радиогидроакустической системы мониторинга морской экономической зоны / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, Волков, А.П. Шевченко // Вестн. ДВО РАН (Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences). – 2015. – Т. 2 (№ 180). –«Науки о земле», раздел «Геология, геофизика». – С. 60–67.

7. Стародубцев, П.А. Некоторые современные теоретические взгляды на процесс реализации просветных систем мониторинга характеристик гидрофизических полей морской среды / П.А. Стародубцев, Е.Н. Бакланов, А.П. Шевченко, М.В. Мироненко // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2015. – Т. 34. – С. 39–44.

8. Стародубцев, П.А. Акустическая томография океана и упрощенный инструментарий ее реализации в мультистатической схеме с целью обеспечения безопасности мореплавания / П.А. Стародубцев, А.П. Шевченко, Е.П. Стародубцев, Е.Н. Бакланов // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2015. – Т. 35. – С. 56–65.

9. Стародубцев, П.А. Новые измерительные технологии параметров океанской среды / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, Е.Н. Бакланов // Наука сегодня: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. 28 октября 2015 г., НЦ «Диспут». – Вологда, 2015. – С. 7–15.

10. Стародубцев, П.А. Обнаружение акустически слабозаметных морских объектов просветными гидроакустическими системами методом фазового приема и обработки сигналов / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, С.В. Шостак, Е.Н. Бакланов, А.П. Шевченко // Изв. ЮФУ. Технические науки. Раздел «Гидроакустика и подводная робототехника». – Таганрог, 2016. – № 4. –С. 123–133.

11. Стародубцев, П.А. Практические пути прогнозирования сильных землетрясений с использованием донных гидроакустических систем / П.А. Стародубцев, М.В. Мироненко, Е.П. Стародубцев, Е.Н. Бакланов, К.А. Пичугин // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2017. – Т. 40. – С. 29–34.

12. Стародубцев, П.А. Технология оптимальной оценки направления линейной антенной решетки на источник сигнала при воздействии на нее коррелированных помех с неизвестной функцией распределения / П.А. Стародубцев, С.В. Шостак, Р.Н. Алифанов // Журн. Сибирского Федерального университета. Раздел «Техника и технологии». – Красноярск, 2017. – Т. 10, № 2. – С.249–259.

Сведения об авторах: Бакланов Евгений Николаевич, доцент,
e-mail: baklanoven@mail.ru;
Мироненко Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор,
e-mail: professor@mail.primorye.ru;
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор,
e-mail: spa1958@mail.ru;
Стародубцев Евгений Павлович, e-mail: spa1958@mail.ru.