
Мониторинг ледовой обстановки с использованием приборов на основе нелинейной акустики

И.А. Кириченко, И.Б. Старченко, Д.С. Слуцкий, В.Л. Сахаров

ОКБ "РИТМ"

Аннотация: Решение навигационных задач и задач освещения ледовой обстановки при подводном плавании носителя акустической системы, которые возникают при использовании автономных и дистанционных телеуправляемых подводных аппаратов, приводит к необходимости разработки и создания новых средств, позволяющих решать задачи ледовой разведки. Для своевременного освещения ледовой обстановки, наряду с аэрокосмическими методами получения информации, может быть использован метод, основанный на применении гидроакустических приборов, в частности систем на основе нелинейной акустики. Применение для мониторинга ледовой обстановки приборов на основе нелинейной акустики с использованием параметрической излучающей антенны предполагает учет таких особенностей формирования акустического поля, как наличие как низкочастотной разностной частоты, образованной в результате нелинейного взаимодействия двух близких по значению волн накачки, так и, собственно, высокочастотного излучения исходных волн накачки. Разработка приборов для акустического мониторинга ледовой обстановки требует рассмотрения всех возможных реальных океанологических ситуаций, в которых они будут функционировать. В статье рассматриваются результаты разработки системы для панорамного мониторинга ледовой обстановки в параметрическом режиме работы гидроакустических средств. Проведен анализ формирования и распространения зондирующих сигналов в акустическом канале параметрического измерителя толщины льда, сформулирован принцип измерения толщины по отражению (рассеянию) акустических сигналов от локально плоскостной системы с размытыми границами. Проведено математическое моделирование акустической мощности канала измерителя толщины льда и «окон прозрачности» на основе расчёта критических углов падения и преломления. Делается вывод о целесообразности использования в качестве информативных сигналов сдвиговых волн.

Ключевые слова: лед, мониторинг, акустическая антенна, критический угол, окно прозрачности.

Морские нефтегазовые ресурсы по различным данным составляют более половины от общемировых ресурсов [1]. При этом значительная часть запасов приходится на Арктический шельф, освоение месторождений которого требует решения многочисленных комплексных задач [2-5], в числе которых можно выделить:

– недостаточная геологическая и геофизическая изученность акваторий Арктического шельфа [2];

– сезонность в проведении геологоразведочных работ и работ по обустройству месторождений [3];

– необходимость разработки новых технологий и техники для бурения, добычи и транспортировки добываемого нефтегазового сырья [4];

– подледные работы, требующие разработки систем мониторинга подледной обстановки [5].

Для своевременного освещения ледовой обстановки, наряду с аэрокосмическими методами получения информации, может быть использован метод, основанный на применении гидроакустических приборов [5], в частности систем на основе нелинейной акустики [6].

Разработка приборов для акустического мониторинга ледовой обстановки требует рассмотрения всех возможных реальных океанологических ситуаций, в которых они будут функционировать. Для реальных условий работы приборов на основе нелинейной акустики в океане характерны [6, 7]:

– флуктуации гидрофизических параметров (скорость звука, температура, соленость, гидростатическое давление) ;

– изменения гидрологических условий (сезонная зависимость профиля вертикального распределения скорости звука, коэффициента отражения звука от дна и коэффициента обратного объемного рассеяния, пространственно-временная изменчивость характеристик подводных звуковых каналов, пространственно-временная изменчивость водной среды, обусловленная влиянием рельефа дна и береговой линии).

Перечисленные факторы показывают, что гидроакустические средства относятся к сложным техническим системам сбора и обработки информации, функционирующим в условиях неопределенности при изменяющихся параметрах системы и характеристиках среды эксплуатации.

Известные в настоящее время средства освещения ледовой обстановки обладают рядом недостатков, основными из которых являются [5]:

- невозможность определения рельефа нижней поверхности льда без хода погруженного носителя;
- малый телесный угол освещения нижней поверхности льда за один цикл излучения-приема;

Решение навигационных задач и задач освещения ледовой обстановки при подводном плавании носителя акустической системы, которые возникают при использовании автономных и дистанционных телеуправляемых подводных аппаратов [8], приводит к необходимости разработки и создания новых средств, позволяющих решать задачи ледовой разведки. Основными задачами, решаемыми приборами для мониторинга ледовой обстановки являются:

- измерение расстояния до нижней кромки льда в широком секторе углов над подводным аппаратом и впереди по направлению движения;
- измерение толщины льда;
- определение состояния водной поверхности.

Также, с точки зрения влияния лучевой картины на распространение акустических волн, важно учитывать гидрологические условия в мелководных районах Арктического шельфа [9]. Поэтому необходимо проведение анализа распределение скорости звука от поверхности моря до дна в районе проводимого мониторинга ледовой обстановки. На рисунке 1 показаны распределения скорости звука в северной и южной части Баренцева моря [10].

Учет только вертикального распределения скорости звука с глубиной не обеспечивает достоверного прогнозирования дальности действия приборов на основе нелинейной акустики. Должны быть учтены такие факторы, как влияния дна, состояние раздела сред, физическое и химическое

состояние среды, влияние которых особо велико в условиях Арктического шельфа [5-7, 11].

Наряду с кинематическими и термодинамическими неоднородностями в океане наблюдаются объемные неоднородности иной природы: растворенные вещества, взвешенные частицы пыли, песка, газовые пузырьки, биологические звукорассеивающие слои.

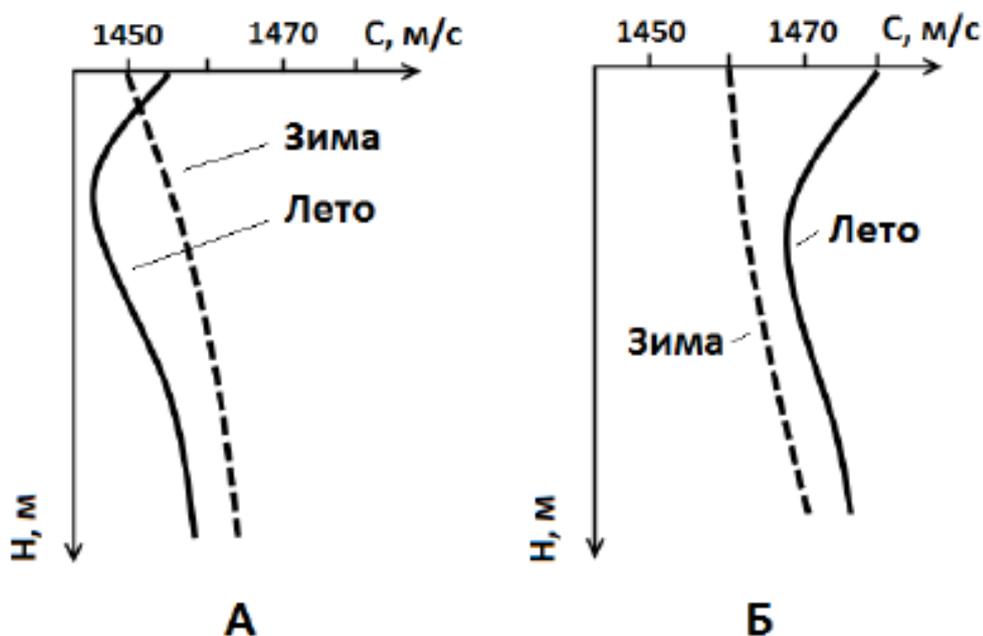


Рисунок 1 – Распределение скорости звука в северной (А) и южной (Б) частях Баренцева моря [10]

Наибольшее влияние на процесс нелинейного взаимодействия и формирование волны разностной частоты оказывают газовые пузырьки, которые изменяют величину скорости звука и нелинейность среды распространения, увеличивают рассеяние и поглощение звука в морской среде [12]. Результаты экспериментальных исследований поперечных распределений поля звукового давления при прохождении волны разностной частоты через нестационарную структуру газовых пузырьков в воде и

обратного объемного рассеяния, рассмотренные в [13], показали, что поперечные распределения и, соответственно, направленные свойства излучающей акустической антенны, представляют собой результат влияния нескольких механизмов на процесс формирования волны разностной частоты. Среди них можно выделить:

- нерезонансное рассеяние волны разностной частоты на слое газовых пузырьков;
- поглощение акустической энергии волны разностной частоты и исходных волн накачки;
- затухание, изменение скорости распространения акустических волн и параметра нелинейности водной среды в слое газовых пузырьков.

Волна разностной частоты, прошедшая через слой газовых пузырьков, ослаблена по сравнению с результатом взаимодействия в однородной среде на 8 – 10 дБ [13], а присутствие в области нелинейного взаимодействия объемной области газовых пузырьков, протяженность которой превышает пространственный размер излучаемого импульса и длины акустических волн участвующих в нелинейном взаимодействии, приводит к существенным изменениям поперечных распределений. Таким образом, рассеянное на нестационарной структуре газовых пузырьков, акустическое поле с одной стороны изменяет условия формирования и распространения волны разностной частоты, а с другой – позволяет осуществлять дистанционное зондирование таких неоднородностей с целью определения их пространственных и акустических характеристик [13].

Применение для мониторинга ледовой обстановки приборов на основе нелинейной акустики с использованием параметрической излучающей антенны предполагает учет таких особенностей формирования акустического поля, как наличие как низкочастотной разностной частоты, образованной в результате нелинейного взаимодействия двух близких по значению волн

накачки, так и, собственно, высокочастотного излучения исходных волн накачки [6, 7, 12, 13].

Необходимо отметить, что высокая эффективность преобразования энергии высокочастотных волн накачки в энергию разностных волн в параметрической излучающей антенне достигается при условии, что формируется высоконаправленное излучение с шириной основного лепестка характеристики направленности преобразователя исходных волн накачки не более $4-6^\circ$ [6, 7]. Для условий применения в целях мониторинга ледовой обстановки автономных, телеуправляемых и буксируемых аппаратов [8] важным является учет таких конструктивных и тактических параметров акустических приборов, как габаритные размеры акустических антенн, необходимая акустическая и, соответственно, потребляемая электрическая мощность [14].

Как уже было отмечено, принцип действия гидроакустических приборов на основе нелинейной акустики основывается на излучении в водную среду первичных высокочастотных волн накачки, результатом нелинейного взаимодействия которых является генерация в некотором объеме морской воды, прилегающей к антенне, сигналов разностной частоты [6, 7]. Излученные преобразователем накачки высокочастотные акустические сигналы и сформированные в результате нелинейного взаимодействия исходных волн накачки низкочастотные акустические сигналы волны разностной частоты распространяются в морской среде и отражаются от ледового покрова. Эхо-сигналы, как от исходных волн накачки, так и волны разностной частоты, отраженные от неоднородностей морской среды, содержат необходимую информацию о результатах зондирования озвученного объема, принимаются высокочастотной и низкочастотной приемными акустическими антеннами и обрабатываются в приемном тракте прибора.

Основные требования к гидроакустическим приборам для мониторинга ледовой обстановки на основе нелинейной акустики принципиально не отличаются от требований, которыми руководствуются при разработке традиционных гидроакустических систем [7]:

- обеспечение необходимого уровня звукового давления на рабочей (разностной) частоте или в диапазоне рабочих (разностных) частот;
- обеспечение требуемой направленности излучения; обеспечение необходимой длительности зондирующего импульса;
- обеспечение заданных массогабаритных показателей, энергопотребления и др.

Определенные ограничения накладываются на тракт приема, обработки и регистрации, поскольку рабочая частота приемной антенны не совпадает с частотами, излучаемыми преобразователями накачки [15]. В зависимости от назначения и требуемых характеристик прибора для мониторинга ледовой обстановки прием отраженных акустических сигналов можно осуществлять на различные типы приемных антенн:

- резонансную антенну с такой же характеристикой направленности, как в режиме излучения (при этом увеличиваются общие размеры акустической системы);
- резонансную антенну с такими же, как у преобразователя накачки, линейными размерами (при этом характеристика направленности оказывается в режиме приема шире, чем в режиме излучения);
- дополнительную широкополосную антенну, размещенную рядом с преобразователями накачки (вокруг него или встроенную в него).

При разработке прибора для мониторинга ледовой обстановки возможны различные варианты постановки задачи выбора оптимальных параметров. Например, заданы размеры акустической системы, необходимо определить оптимальную частоту, обеспечивающую максимальную

дальность действия при фиксированной мощности. Либо задана направленность антенны, а определяется оптимальная частота и дальность. При решении традиционными методами поставленных выше задач предполагается тесная взаимосвязь между размерами, излучаемой частотой и направленностью антенны. В параметрических антеннах, в отличие от обычных антенн, такой жесткой связи между перечисленными параметрами нет. Характеристика направленности на разностной частоте определяется направленностью преобразователя на частотах накачки и длиной зоны взаимодействия и сохраняется одинаковой в широком диапазоне частот [6, 7, 15].

Решение задачи измерения толщины льда предполагает пространственную фильтрацию эхосигнальной информации, которая будет обеспечивать локальное измерение толщины льда и панорамный обзор в поперечной плоскости. Пространственная фильтрация в таких системах реализуется путем формирования и управления пространственных каналов в режиме излучения волн накачки [5]. На рисунке 2 показан принцип мониторинга толщины льда с использованием прибора на основе нелинейной акустики.

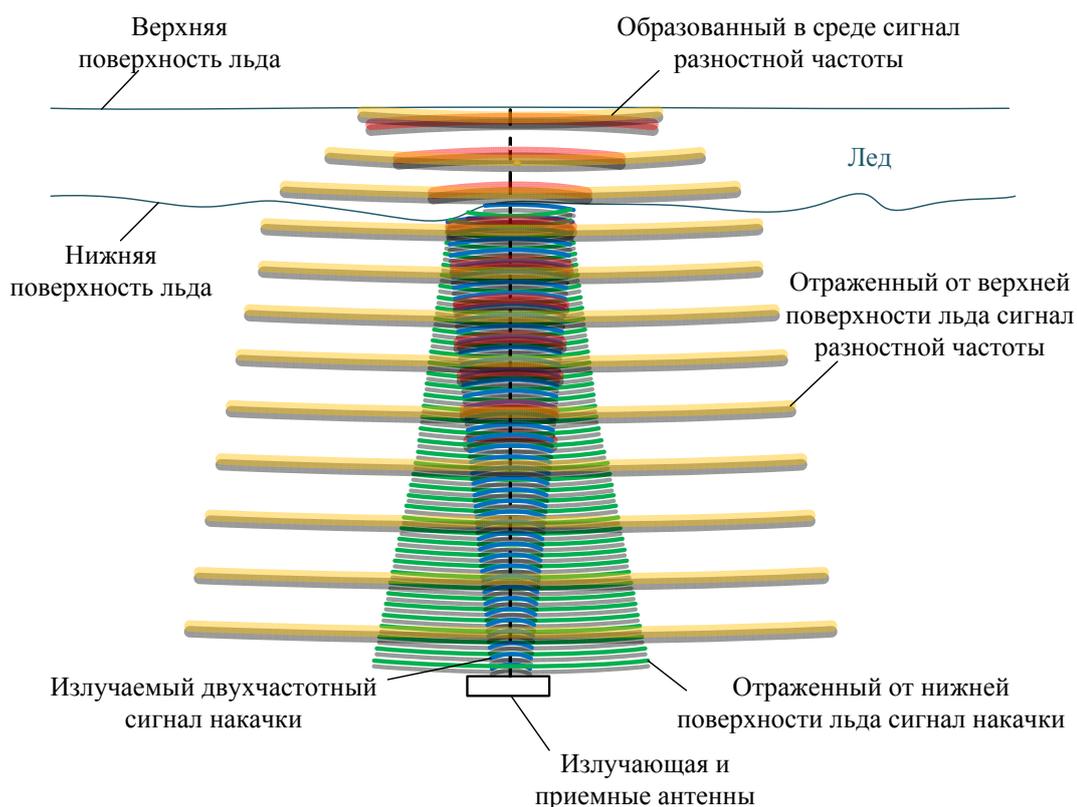


Рисунок 2 – Принцип мониторинга толщины льда с использованием прибора на основе нелинейной акустики

Нелинейный способ генерации зондирующих измерительных сигналов прибора для мониторинга толщины льда позволяет обеспечить формирование в низкочастотной области спектра узкой характеристики направленности с уровнем бокового поля вне основного лепестка не более минус 40 дБ [6].

В качестве метода измерения толщины ледового покрова, принцип действия которого показан на рисунке 2, можно использовать импульсный метод, в основе которого лежит измерение времени задержки импульсных сигналов при распространении их в толще льда [14]. Величины скорости продольных и сдвиговых волн в морском льде характеризуется высокой степенью изменчивости. Источником возникновения погрешности в величине скорости также может оказаться значительная неоднородность этого параметра по вертикальной координате [16].

Наиболее важным параметром, характеризующим гидролокационную систему обнаружения или классификации, является дальность действия. Указанный параметр, как известно [17] существенно зависит от условий распространения акустической энергии, поэтому различают энергетическую дальность в однородной (безграничной) среде и дальность действия в реальных условиях. При проектировании и расчете гидролокаторов, как правило, оперируют энергетической дальностью действия. Задача расчета обычно сводится к определению необходимой акустической мощности при выбранной оптимальной рабочей частоте для достижения заданной дальности.

Методика расчета характеристик параметрических гидролокаторов имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой тракта излучения, принцип действия которого основан на использовании эффекта нелинейного взаимодействия волн [6]. Основой для расчета энергетических параметров является уравнение гидролокации [9].

Если принять, что шумовая помеха носителя гидроакустической станции значительно превышает реверберационную (а такая ситуация реальна в очень многих случаях: при больших шумах, при работе на низких частотах, при коротких длительностях импульсов и т.д.) [17], то акустическое давление помех будет определяться только шумовой помехой.

Для вычисления акустической мощности по каждой из частот накачки, необходимой для обнаружения известной цели на заданной дистанции в присутствии шумовой помехи, можно воспользоваться формулой [6]:

$$W_a(z) = \frac{z \cdot 10^{0.05 \alpha z} \cdot \delta \cdot P_{no} \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot c^3}{e^{-(z/L_3)} \cdot |I(z)| \cdot F^3 \cdot 3.5 \pi \cdot R_s \cdot \sqrt{\gamma_{изл} \tau}}$$

Результаты расчета акустической мощности для центральной частоты накачки 250 кГц и разностной частоты 50 кГц, обеспечивающей энергетическую дальность действия 250 м, приведены на рисунке 3.

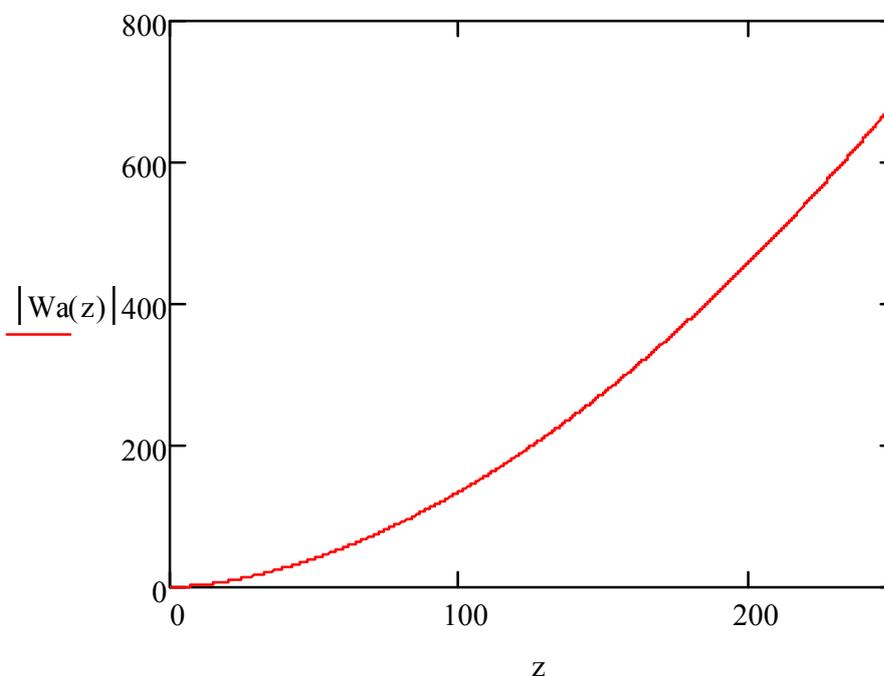


Рисунок 3 – Результаты расчета акустической мощности

Лед, как твердая среда, допускает в дополнение к волнам давления также распространение поперечных волн. Соответствующая поперечная составляющая скорости звука, будет меньше, чем скорость продольной компоненты. Общим выводом работы [18] является значительная изменчивость скорости продольных волн в льде, связанная с условиями его образования. В то же время величина скорости сдвиговых волн отличается большей стабильностью и устойчивостью к изменению условий образования ледяного покрова. Зависимость коэффициентов прохождения из воды в лед по энергии для продольных $Dl(\theta)$ и поперечных $Dt(\theta)$ от угла падения волн для значений скорости продольных волн – 3980 м/с, скорости поперечных волн – 1960 м/с показана на рисунке 4.

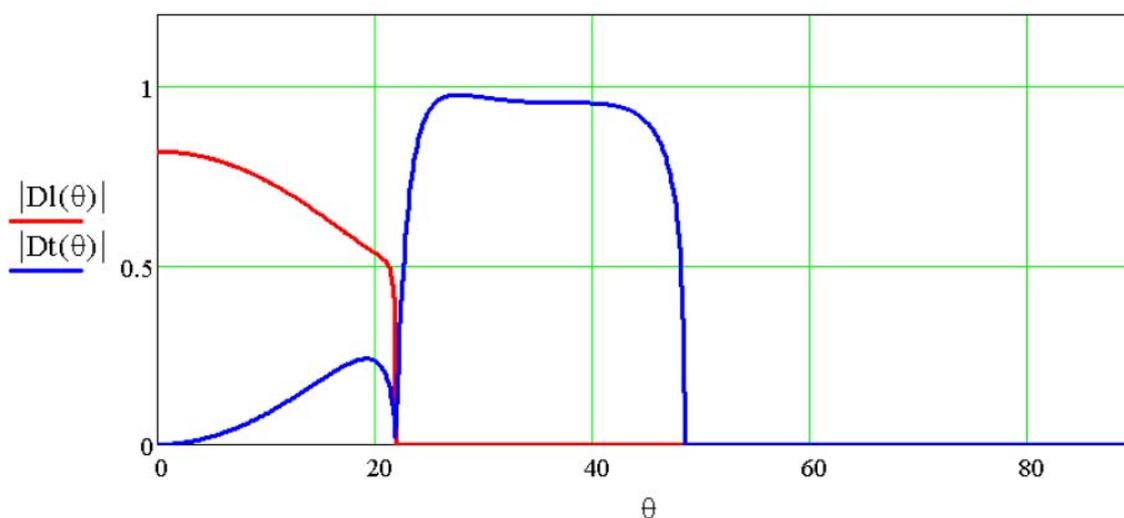


Рисунок 4 – Результаты расчета критических углов

Определенные для данного случая значения первого и второго критических углов равны $\alpha_{кр1}=22,1^{\circ}$ и $\alpha_{кр2}=48,9^{\circ}$, соответственно. Максимальный угол падения, при котором возможно измерение толщины льда на продольных волнах – $22,1^{\circ}$, а на поперечных волнах – $48,9^{\circ}$. Таким образом, явление полного внутреннего отражения зондирующих сигналов при углах больше $22,1^{\circ}$ будет являться ограничивающим фактором для реализации зондирования пространства впереди автономного носителя с использованием продольных волн. Поэтому для значений углов падения больше $22,1^{\circ}$, необходимо использовать в качестве информативных сигналов сдвиговые волны.

Литература

1. Авдонин В.В., Кругляков В.В., И.Н. Пономарева, Титова Е.В. Полезные ископаемые Мирового океана М.: МГУ. – 2000. - 160 с.
2. Ефремкин И.М., Холмянский М.А. Геоэкологическое сопровождение освоения нефтегазовых месторождений арктического шельфа. – СПб.: Недра, 2008. –315с.

3. Гаврилов В.П. О целесообразности ускорения освоения нефтегазовых ресурсов арктических морей и прилегающих районов Крайнего Севера России // Нефть, газ Арктики: материалы междунар. науч.-техн. конф. – М., 2006. –С. 343-351.
 4. Ильин Г. В., Шавыкин А.А. Освоение северных маршрутов транспортировки нефтегазового сырья и связанные с этим экологические проблемы // Ученые зап. Мурман. гос. пед. Ун-та. Сер. Геогр. науки. –2007. – No 2. –С. 72-90.
 5. Богородский А.В., Лебедев Г.А. Основные принципы построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Пробл. Арктики и Антарктики. –2009. –№1. –С. 69-79.
 6. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
 7. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2004. – 416 с.
 8. Агеев М.Д., Киселев Л.В, Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука.- 2005.-398с.
 9. Сташкевич А.П. Акустика моря. - Л.: Судостроение – 1966. – 334 с.
 10. Бойцов В. Д. Сезонная изменчивость основных гидрометеорологических параметров // Закономерности формирования сырьевых ресурсов побережья Баренцева моря и рекомендации по их промысловому – Апатиты. - 1994. – С.9-16.
 11. Старченко И.Б., Кириченко И.А. Адаптивные гидроакустические средства: состояние и перспективы развития // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – №9 (1146). – С.20-24.
-

12. Буланов, В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей / Дальнаука. – 2001. – 280 с.
13. Кириченко И.А., Коновалова С.С. Экспериментальное исследование обратного объемного рассеяния на моделях рассеивателей // Известия ТРТУ. – Таганрог, 2002. – №6(29). – С.97–103.
14. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. СПб.: Наука. - 2004. – 410 с.
15. Тарасов С.П., Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2007. – 448с.
16. Нагучев Д.Ш., Сахаров В.Л., Савицкий О.А. Разработка технологии создания технических средств освещения ледовой обстановки в параметрическом режиме // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №12 (89). – С. 155-159.
17. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. - Л.: Судостроение. - 1981.- 206с.
18. Богородский В.В., Гусев А.В. Затухание звуковых волн во льду в диапазоне частот 200–1100кГц // Акустический журнал. – Т.19. вып.2. - 1973. - С. 133-139.

References

1. Avdonin V.V., Krugljakov V.V., I.N. Ponomareva, Titova E.V. Poleznye iskopaemye Mirovogo okeana. [Natural resources of the oceans]. М.: MGU. 2000. 160 p.
 2. Efremkin I.M., Holmjanskij M.A. Geojekologicheskoe soprovozhdenie osvoenija neftegazovyh mestorozhdenij arkticheskogo shel'fa. [Geocological support of oil and gas deposits on the Arctic shelf]. SPb.: Nedra, 2008. 315p.
 3. Gavrilov V.P. Neft', gaz Arktiki: materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. М., 2006. pp. 343-351.
-



4. Il'in G. V., Shavykin A.A. Uchenye zap. Murman. gos. ped. Un-ta. Ser. Geogr. nauki. 2007. No 2. pp. 72-90.
5. Bogorodskij A.V., Lebedev G.A. Probl. Arktiki i Antarktiki. 2009. №1. pp. 69-79.
6. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokacii. [Parametric sonar antenna]. L.: Sudostroenie, 1990. 256 p.
7. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy. [Parametric sonar systems] Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2004. 416 p.
8. Ageev M.D., Kiselev L.V, Matvienko Ju.V. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tehnologii [Autonomous Underwater Robots: Systems and Technologies]. M.: Nauka. 2005. 398p.
9. Stashkevich A.P. Akustika morja. [Acoustics sea]. L.: Sudostroenie. 1966. 334 p.
10. Bojcov V. D. Zakonomernosti formirovaniya syr'evyh resursov pribrezh'ja Barenceva morja i rekomendacii po ih promyslovomu Apatity. 1994. pp.9-16.
11. Starchenko I.B., Kirichenko I.A. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Taganrog: Izd-vo JuFU, 2013. №9 (1146). pp.20-24.
12. Bulanov, V.A. Vvedenie v akusticheskuyu spektroskopiju mikroneodnorodnyh zhidkostej [Introduction to acoustic spectroscopy of liquids microinhomogeneous]. Dal'nauka. 2001. 280 p.
13. Kirichenko I.A., Konovalova S.S. Izvestija TRTU. Taganrog, 2002. №6 (29). pp.97–103.
14. Korjakin Ju.A., Smirnov S.A., Jakovlev G.V. Korabel'naja gidroakusticheskaja tehnika. [Ship sonar technology]. SPb.: Nauka. 2004. 410 p.
15. Tarasov S.P., Voronin V.A., Kuznecov V.P., Mordvinov B.G., Timoshenko V.I. Nelinejnye i parametricheskie processy v akustike okeana. [Nonlinear and



parametric processes in the ocean acoustics]. Rostov–na–Donu: Rostizdat, 2007. 448p.

16. Naguchev D.Sh., Saharov V.L., Savickij O.A. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2012. №12 (89). pp. 155-159.

17. Matvienko V.N., Tarasjuk Ju.F. Dal'nost' dejstvija gidroakusticheskikh sredstv. [The range of the sonar]. L.: Sudostroenie. 1981. 206p.

18. Bogorodskij V.V., Gusev A.V. Akusticheskij zhurnal. T.19. vyp.2. 1973. pp. 133-139.

ii. № 44, 2008.