

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БОЛЬШИХ ДАЛЬНОСТЯХ

© 2019 г. Ю. Н. Моргунов<sup>а</sup>, А. А. Голов<sup>б, \*</sup>, С. И. Каменев<sup>а</sup>, Ю. В. Матвиенко<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

<sup>б</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН, ул. Суханова 5а, Владивосток, 690091 Россия

\*e-mail: [golov\\_alexander@inbox.ru](mailto:golov_alexander@inbox.ru)

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 06.07.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

В статье обсуждаются возможности и пути применения методов и средств общей и спутниковой океанологии для обеспечения высоких точностей акустического позиционирования автономных подводных аппаратов (АПА) на расстояниях в сотни километров от постов управления. Приводятся результаты анализа многолетних исследований авторов в области акустической дальнометрии, которые выявили специфические особенности распространения низкочастотных импульсных сигналов в различных гидролого-акустических условиях формирования подводных звуковых каналов различного происхождения. Особое внимание уделено исследованию возможности и эффективности применения баз данных многолетних океанологических наблюдений для формирования пространственно-временных характеристик подводных звуковых каналов в районах дальнего навигационного обеспечения миссий АПА. Отдельно рассмотрены возможности применения спутниковых наблюдений поверхностной температуры моря для обеспечения расчетного блока координат АПА данными об интегральной (эффективной) скорости звука в приповерхностном звуковом канале, который формируется в зимний сезон. Результаты экспериментальной апробации методик применения океанологических технических средств в Японском море показали, что их применение позволяет повысить точность и надежность навигационного обеспечения АПА на удалениях в сотни километров от береговых постов управления. Для летне-осенних и зимних гидрологических условий показана возможность определять собственные координаты АПА с ошибками, не превышающими сотые процента на расстояниях в сотни километров.

*Ключевые слова:* гидроакустика, подводная навигация, эффективная скорость звука, приповерхностный звуковой канал, подводный звуковой канал

DOI: 10.1134/S032079191906011X

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современной подводной робототехники является увеличение радиуса действия автономных необитаемых подводных аппаратов (АПА). Решение задачи связано с обеспечением АПА данными измерений расстояний от источников навигационных сигналов (ИНС) до приемной системы с необходимой точностью. Авторами разработан и многократно апробирован способ позиционирования подводных объектов [1], который базируется на размещении ИНС на малых глубинах вблизи береговой черты, а приемных систем АПА на глубинах залегания оси подводного звукового канала (ПЗК) в глубоком море. При этом реализуется практически прямолинейное распространение акустических волн вблизи дна на шельфе с последующим

“сползанием” на ось ПЗК в глубоком море. В совокупности с применением для излучения сложных фазоманипулированных сигналов этот способ позволяет с точностью в сотые доли процента измерять расстояние между корреспондирующими точками, используя точное время распространения акустического сигнала и значение скорости звука на оси ПЗК [2–4]. Опыт исследований авторов, направленных на решение задач подводной дальнометрии на расстояниях в сотни километров, показал, что для достижения высоких точностей измерений на первый план выходит знание гидролого-акустической обстановки в районе выполнения миссий АПА. В частности, очень важны пространственно-временные характеристики поля скорости звука на оси ПЗК в районе выполнения миссий АПА, которые могут из-

меряться инструментально или прогнозироваться на основе анализа баз океанологических данных.

Целью исследований, результаты которых обсуждаются в статье, является анализ возможности применения методов и средств общей и спутниковой океанологии для обеспечения высокоточного позиционирования и управления АПА, выполняющих миссии на удаленностях в сотни километров от береговых командных постов.

В основу решения целевой задачи были положены результаты анализа многолетних исследований авторов в области акустической дальнометрии, которые выявили специфические особенности распространения низкочастотных импульсных сигналов в различных гидролого-акустических условиях формирования ПЗК различного происхождения. Особое внимание уделено исследованию возможности и эффективности применения баз данных многолетних океанологических наблюдений для формирования пространственно-временных характеристик ПЗК в районах дальнего навигационного обеспечения миссий АПА. Отдельно рассмотрены возможности применения спутниковых наблюдений поверхностной температуры моря для обеспечения расчетного блока координат АПА данными об интегральной (эффективной) скорости звука в приповерхностном звуковом канале (ППЗК), который формируется в зимний сезон.

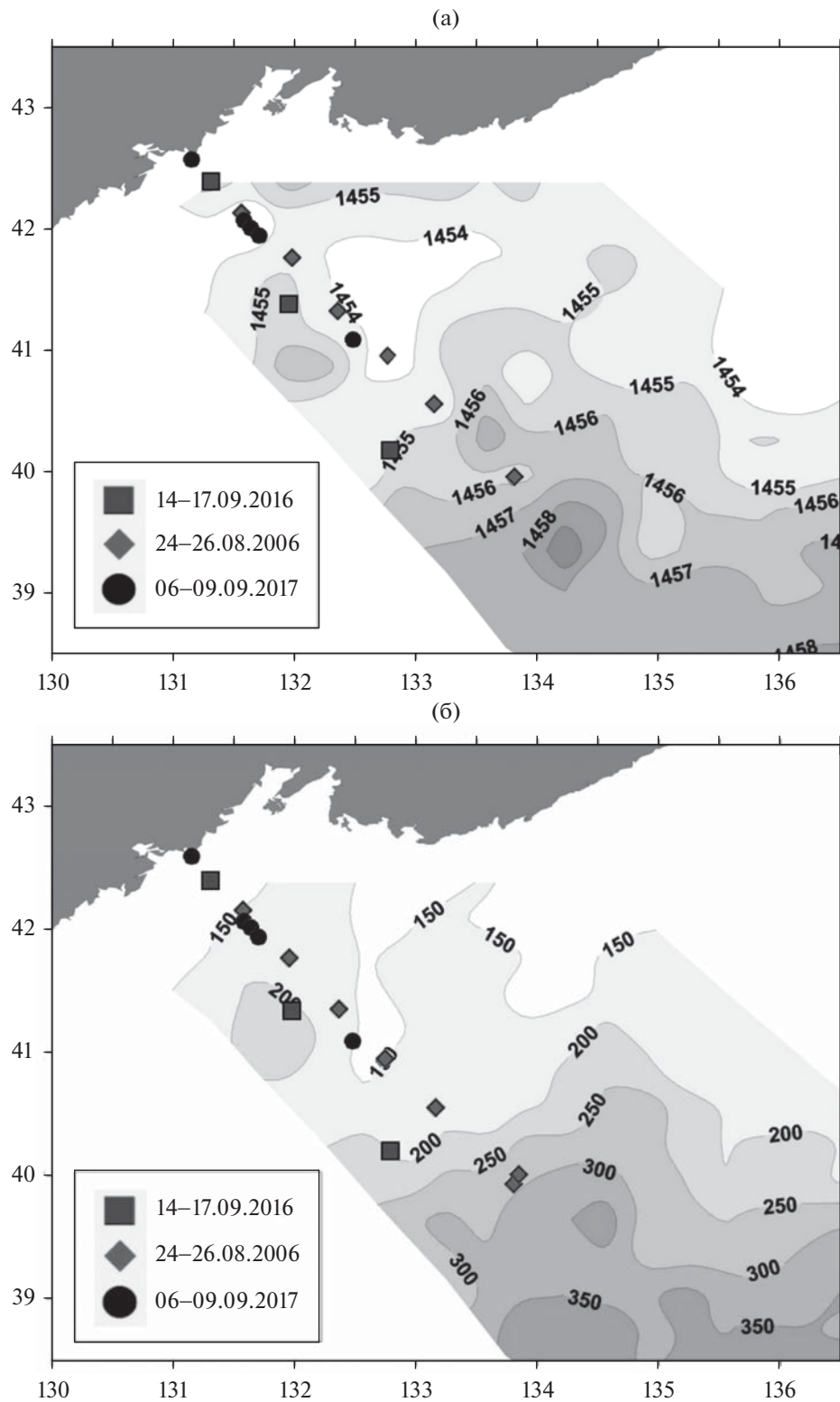
При решении поставленных задач были использованы данные океанологических наблюдений, проведенных в разные годы организациями России, Японии, КНДР, Республики Корея и США и имеющихся в ТОИ ДВО РАН. Это данные станций батиметрических наблюдений (с разреженной дискретностью по вертикали, которая равна или близка к стандартным горизонтам), а также STD-наблюдения, у которых более высокое разрешение по вертикали. В результирующем океанографическом массиве присутствует информация с 23247 станций, выполнявших измерения с 1925 по 2017 гг. На каждой океанографической станции проводилась интерполяция значений температуры и солёности на горизонтах, кратных пяти метрам. Затем на всех горизонтах производился расчет скорости звука по формуле Чена–Миллера [5] и осуществлялся поиск оси ПЗК (минимум скорости звука) и глубины залегания оси.

На рис. 1а и 1б приведен пример расчета пространственного распределения значений скорости звука на оси ПЗК и глубин ее залегания по многолетним данным в северо-восточной части Японского моря. На этих же рисунках маркерами обозначены места проведения инструментальных измерений скорости звука и глубины залегания оси на океанологических станциях, выполнен-

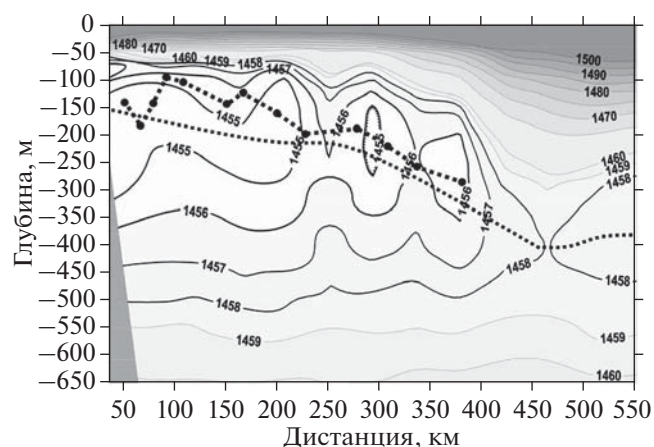
ных авторами в разные годы в летне-осенний период [1–3]. Результаты этих измерений (скорость на оси ПЗК и глубина ее залегания) были нанесены на рис. 2 (точки, соединенные пунктиром), на котором представлено поле скорости звука на разрезе от м. Гамова до банки Кита-Ямато, рассчитанное по многолетним данным, для значений солёности 33.6–42.2 промилле, в период максимального прогрева поверхностных вод (с 15 августа по 15 сентября). Штриховой линией обозначено примерное нахождение оси ПЗК по данным многолетних измерений.

Анализ приведенных данных показывает, что значения скоростей звука на оси ПЗК, полученные по многолетним данным, очень близки к полученным в ходе экспериментов и расположены в пределах значений 1454.5–1456.2 м/с на всей 200-мильной трассе. Следовательно, применение океанологического массива скоростей звука на оси ПЗК для расчетов расстояний позволит обеспечить измерения с ошибками, не превышающими 100–150 м (табл. 1). Очень важным обстоятельством является то, что стабильные значения скорости звука на оси ПЗК наблюдаются, несмотря на значительные изменения глубин залегания оси ПЗК с расстоянием (рис. 2). Это означает, что многолетние климатические данные в целом корректно описывают закономерности формирования и количественные характеристики ПЗК на дистанциях до 200 миль. Эти результаты хорошо вписываются и дополняют приведенный выше способ позиционирования подводных объектов [1] и могут быть использованы при технической и методической реализации высокоточного навигационного обеспечения АПА в данном районе в летне-осенний период.

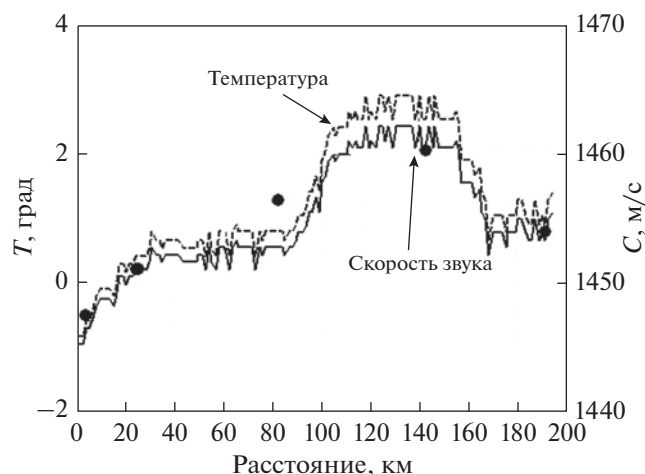
Для зимних гидролого-акустических условий, характеризующихся образованием приповерхностного звукового канала, может быть использован более совершенный метод обеспечения АПА в реальном времени данными о скорости звука в приповерхностном слое для дальномерных измерений. Метод заключается в использовании спутниковых наблюдений за динамикой и структурой поверхностных температурных полей на акваториях функционирования АПА. Развитие данного направления в нашем случае было связано с уникальным результатом, полученным при выполнении эксперимента в марте 2016 г. в Японском море, который был направлен на измерение расстояния акустическим методом и подробно описан в работе [6]. Измерения времени пробега импульсов от ИНС до приемной системы и вертикального распределения скорости звука были сделаны в пяти точках на трассе протяженностью 200 км. В каждой точке рассчитывались расстояния путем умножения скорости звука в приповерхностном слое на время распространения импульса и сравнивались с данными GPS. В



**Рис. 1.** (а) – Средняя скорость звука (м/с) на ПЗК и (б) – глубина залегания (метры) ПЗК по результатам многолетних данных и контрольных STD-измерений в летне-осенний период. Точками обозначены места проведения STD-измерений в разные годы.



**Рис. 2.** Среднее многолетнее распределение скорости звука (м/с) на разрезе м. Гамова—возвышенность Ямато в августе—сентябре (дистанция — от м. Гамова). Мелким пунктиром обозначено примерное нахождение оси ПЗК по данным многолетних измерений.



**Рис. 3.** Зависимости гидрологических измерений (точки) и спутниковых данных поверхностной температуры и скорости звука (кривые) от расстояния.

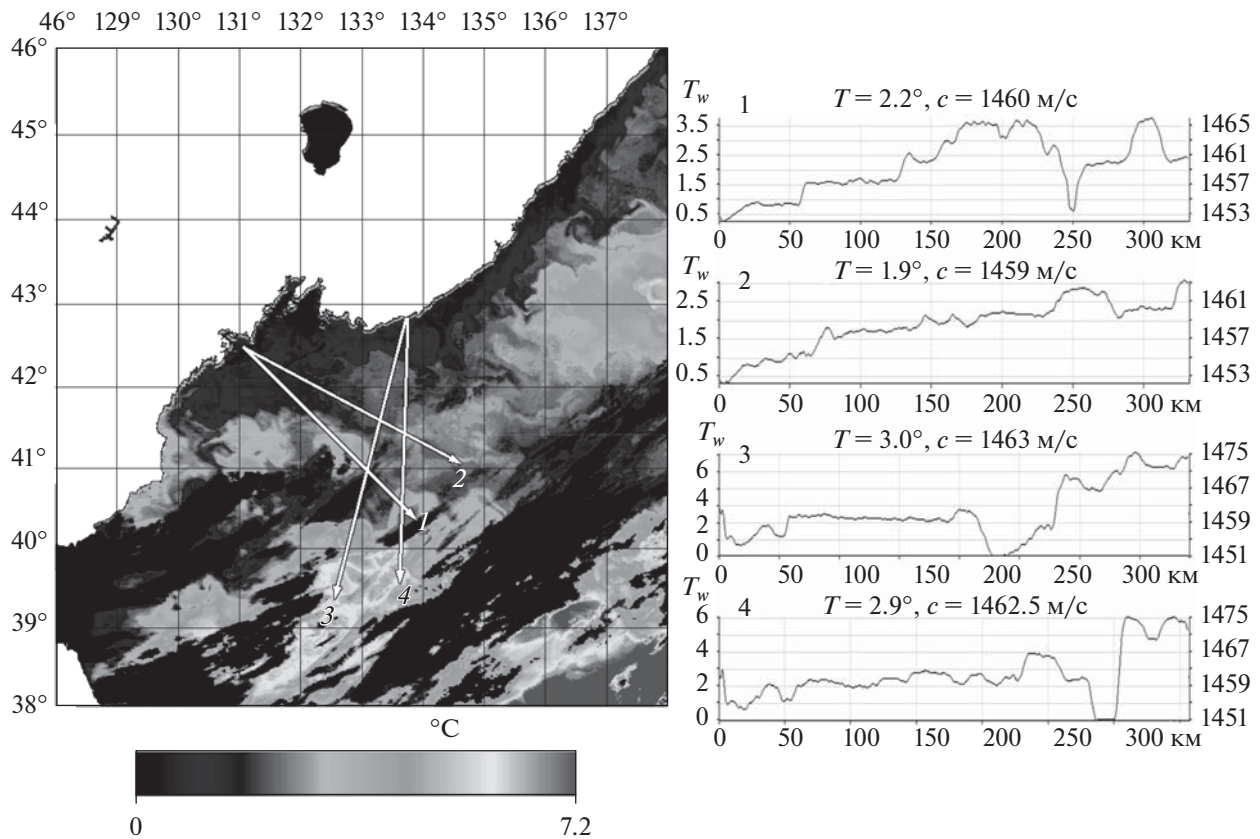
первых трех точках ошибки измерения расстояния не превышали сотых долей, т.к. скорости звука были приблизительно одинаковы (рис. 3). Далее ошибки существенно увеличились, т.к. в четвертой точке на трассе было зафиксировано увеличение температуры (скорости звука) у поверхности по сравнению с остальными. Это было связано с тем, что измерение скорости звука осуществлялось в одной точке и не представлялось возможности оценить пространственные размеры этой неоднородности для корректного расчета интегральной скорости на трассе. Проблему удалось решить путем анализа спутниковых инфракрасных (ИК) снимков поверхностной температуры акватории проведения эксперимента. Снимки показали, что акустическая трасса пересекала периферию синоптического вихря, т.е. акустические волны проходили 50-километровый участок с более теплыми водами (рис. 3). Это и позволило оценить интегральную (эффективную) скорость звука на трассе и снизить ошибки измерений расстояний до сотых долей процента. Очень важно, что сравнение скоростей звука в приповерхностном слое, рассчитанных из STD-измерений и по данным ИК-снимков (рис. 3), показало высокую сходимость значений, т.к. это

открывает широкие возможности применения методов спутниковой океанологии в задачах позиционирования подводных объектов на больших дальностях.

На рис. 4 приведен вариант гидролого-акустического обеспечения навигационного района с двумя ИНС данными ИК-снимков со спутника NOAA-18 на 28 марта 2018 г. и поверхностной температуры (скорости звука) для 4-х трасс, выбранных произвольно в северо-восточной части Японского моря. Можно отметить стабильные участки (от 50 до 200 км) температурных зависимостей на трассах № 2–4. Существенные неоднородности в мелководной прибрежной зоне связаны с погодными условиями на шельфе, а на расстояниях более 200 км сказывается влияние теплых водных масс в зоне фронтального раздела [7]. На трассе № 1, с расстояния 150 км, отмечается влияние синоптического вихря с теплыми водами. Интересно, что подобный вихрь был зафиксирован нами 3 марта 2016 г. на этой же трассе [8], что может свидетельствовать о стационарном характере вихревой системы в данном районе. Таким образом, представленные данные обладают достаточной полнотой и надежностью для создания поля эффективных скоростей звука в ППЗК

**Таблица 1.** Сравнение данных точечного определения скорости звука на ПЗК STD-зондом с данными многолетних наблюдений

Дистанция, км	50	100	200	366
Скорость звука по данным STD-измерений, м/с	1455	1455.7	1456.2	1456.8
Скорость звука по данным многолетних наблюдений, м/с	1454.5	1455	1455.5	1456.2
Разность оценки дальности, м	17	64	97	150



**Рис. 4.** Данные ИК-снимка со спутника NOAA-18 на 28 марта 2018 г. и разрезы поверхностной температуры (скорости звука) для 4-х трасс. На рисунке:  $T$  – средняя температура на трассе;  $c$  – средняя скорость звука на трассе.

в заданной акватории для повышения точности навигационных систем АПА в реальном масштабе времени.

В работе авторов [6] было экспериментально показано, что ошибки измерения расстояний акустическими методами при использовании в расчетах значений скорости звука на оси ППЗК, измеренных по спутниковым данным, не превышают 100–150 м при удалении АПА до 200 км. Следовательно, приведенные в статье результаты позволяют рассчитывать на такие же точности при выполнении миссий АПА в условиях зимней гидрологии. А наличие у оператора на береговом посту управления АПА (или группировкой АПА) карты района с данными поверхностной температуры может обеспечить в зимний период оперативный контроль над изменениями скорости звука в зоне функционирования АПА, с последующей передачей этих изменений на борт АПА по гидроакустическому каналу для корректировки расчетов собственных координат.

Таким образом, результаты приведенного исследования демонстрируют определяющий вклад знаний гидрологических условий в районе навигационного обеспечения АПА для достижения высоких точностей определения координат при

выполнении миссий на удалениях в сотни километров от береговых постов управления. На примере Японского моря показаны пути решения задач высокоточного позиционирования АПА при использовании методов и технических средств общей и спутниковой океанологии. Применение их может обеспечить прогноз, а в некоторых случаях и оперативный мониторинг гидрологической обстановки в районе функционирования АПА. Показано, что это дает возможность определять собственные координаты АПА в летне-осенних и зимних гидрологических условиях с ошибками, не превышающими сотые процента на расстояниях в сотни километров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН “Новые вызовы климатической системы Земли”, проект № 18-1-004, ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (тема АААА-А17-117030 110041-5, 2017-219).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 2469346 С1, РФ. Способ позиционирования подводных объектов / Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.А., Го-

- лов А.А. № 2011128643; заявл. 11.07.2011; опубл.10.12.2012, Бюл. № 34.
2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
  3. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 341–347.
  4. Акуличев В.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Применение псевдослучайных сигналов для подводной дальнометрии на шельфе // Докл. Акад. наук. 2010. Т. 432. № 4. С. 541–543.
  5. Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н. Пилотный акустический эксперимент по определению координат подводного объекта в шельфовой зоне Японского моря // Докл. Акад. наук. 2010. Т. 433. № 3. С. 394–396.
  6. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 426. № 6. С. 821–823.
  7. Ильичев В.И., Лобанов В.Б., Митник Л.М. Оценка изменчивости акустических характеристик в области фронтальных зон и мезомасштабных вихрей с использованием данных дистанционного зондирования // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 857–864.
  8. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лебедев М.С. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 646–650.