

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБСЕРВАЦИИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ

Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов,
В.А. Дубина, В.А. Лучин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН¹

Обеспечение позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) на больших удалениях от центров управления зависит от решения задач подводной дальнометрии в сложных гидрологических и батиметрических условиях распространения навигационных сигналов. В связи с этим актуальна разработка методологии эффективной обсервации АНПА на больших акваториях. Проблема заключается в корректном прогнозе и контроле океанологической обстановки и ее изменений в районе навигационного обеспечения с возможностью передачи информации об изменениях на борт АНПА. Особое внимание уделено методическим и техническим средствам мониторинга основных характеристик подводных звуковых каналов различного происхождения в летние и зимние сезоны на примере северо-восточной части Японского моря. Анализируются возможности применения многолетних климатических данных гидрологических измерений в заданном районе, на заданных акустических трассах для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности. Для зимних условий рассмотрены возможности оперативного измерения и контроля эффективных скоростей звука на заданных трассах с использованием данных спутниковых ИК изображений поверхностной температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современных тенденций развития подводных технологий свидетельствует о значительном прогрессе в области создания перспективных робототехнических комплексов. При этом требования к функциональным возможностям автономных подводных аппаратов (АНПА) и робототехнических комплексов различного назначения в последние годы смещаются в сторону значительного увеличения дальностей оперирования от систем управления (сотни миль) [1]. В работах ТОИ ДВО РАН представлены разработки и результаты экспериментальной апробации излучающих и приёмных комплексов, позволяющих обеспечивать АНПА необходимой навигационной и командной информацией на расстояниях до 200 миль [2–5].

Многообразие факторов, влияющих на дальнейшее распространение навигационных и информационных сигналов в сложных гидрологических и батиметрических условиях морей и океанов, потребовало от авторов разработки методов и технологий, позволяющих значительно упростить подходы к решению задач обсервации АНПА. В первую очередь это относится к способу позиционирования подводных объектов [6], который базируется на размещении источников навигационных сигналов (ИНС) на малых глубинах вблизи береговой черты, а приёмных систем АНПА – на глубинах залегания оси подводных звуковых каналов (ПЗК). При выполнении рабочих миссий на глубинах, отличных от глубины залегания оси ПЗК, должно быть предусмотрено всплытие/заглубление АНПА на ось ПЗК с необходимой

периодичностью. Многократная экспериментальная апробация этого метода подтвердила его эффективность, которая обусловлена использованием оптимального для задач навигации канала распространения сигналов из шельфовой зоны в ПЗК. При этом реализуется практически прямолинейное распространение акустической энергии вблизи дна на шельфе и на оси ПЗК в глубоком море с близкими к нулевым углами скольжения лучевых траекторий. В совокупности с использованием для излучения сложных широкополосных импульсных сигналов это позволяет с максимальной точностью измерять расстояние между корреспондирующими точками, так как применение системы единого времени [7] обеспечивает точное измерение

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43.
Тел.: (423) 2311631; Факс: (423) 2312600. E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

времени распространения акустической энергии, а значения скорости звука на оси ПЗК или известны, или прогнозируются на основе оперативных инструментальных измерений [2–4]. Анализ проведенных исследований показал, что одной из основных проблем при решении задач высокоточной обсервации АНПА на больших акваториях является корректный прогноз океанологической обстановки и ее изменений в районе навигационного обеспечения с возможностью передачи информации об изменениях на борт АНПА. Следует отметить, что для передачи команд управления и информации об изменениях скорости звука на АНПА могут использоваться те же сложные сигналы и технические средства [8].

Целью настоящего исследования является разработка методологии применения океанологических измерительных средств и методов для обеспечения оптимального размещения ИНС на побережье и высокоточного позиционирования и управления АНПА, выполняющих миссии на удаленностях в сотни километров от береговых командных постов. При этом позиционирование АНПА производится по сигналам от двух или трёх ИНС, рассредоточенных на значительные расстояния по побережью, результаты измерений должны охватывать весь район навигационного обеспечения АНПА или группировки АНПА.

В качестве объектов исследований определены подводные звуковые каналы различного происхождения и их основные характеристики: скорость звука на оси канала и глубина залегания оси. Рассмотрены два варианта формирования ПЗК, характерные для северо-западной части Тихого океана и прилегающих морей: приповерхностный (зимние сезоны) и глубоководный, формируемый

в летне-осенний период с осью канала на глубине от 100 до 300 м.

■ Информационно-справочная система океанологических данных Японского моря

Для решения целевой задачи на примере Японского моря были определены источники и разработаны подходы к созданию информационно-справочной системы океанологических данных для определения основных характеристик ПЗК (скорость звука на оси канала и глубина залегания оси):

- на основе общих характеристик структуры и динамики вод Японского моря;
- на основе анализа многолетних климатических данных гидрологических измерений в заданном районе, на заданных акустических трассах и в заданный промежуток времени;
- на основе данных спутниковых ИК изображений поверхностной температуры.

■ Общая характеристика района навигационного обеспечения

На первом этапе подготовки к созданию навигационного района рассмотрены общие характеристики структуры и динамики вод Японского моря, которое является полузакрытым бассейном со средней глубиной около 1650 м и максимальной около 3800 м [9]. Море связано с Тихим океаном узкими и мелководными проливами. На юге через Цусимский пролив теплые и соленые воды входят в Японское море, а затем следуют на север у берегов Японии и через проливы Сангарский и Лаперуза выходят в субарктическую зону северо-западной части Тихого океана. Эти теплые и соленые воды образуют верхний слой в южной и юго-восточной части указанного бассейна, который от-

делен от северного региона Полярным фронтом приблизительно на параллели 40° с. ш. Пространственное положение фронта значительно меняется от года к году. На поверхности он в течение года смещается до 200 км к северу или к югу. Максимальные горизонтальные градиенты температуры в зоне фронтального раздела достигают 12–15°С/100 км в подповерхностном слое (горизонт 30 м) и до 6°С/100 км на поверхности моря [10]. Полярный фронт, сопутствующие вихревые образования и температурные режимы на акватории северо-западной части Японского моря описаны в [11,12]. Известно, что вихри с теплым ядром и высокими скоростями звука распространяются на север, а с холодным – на юг.

Таким образом, приведённые данные об особенностях формирования водного режима в Японском море показывают, что определение эффективных скоростей звука на протяженных трассах, соединяющих ИНС с приемниками АНПА, сопряжено с трудностями, которые могут быть преодолены при корректном использовании знаний о формировании ПЗК на акватории функционирования АНПА.

■ Многолетние климатические данные гидрологических измерений в Японском море

Для более точного представления и прогноза гидрологической обстановки, включая характеристики ПЗК на заданной акватории Японского моря, были использованы результаты многолетних океанологических наблюдений, имеющихся в ТОИ ДВО РАН. Для получения исходных данных для численных расчетов характеристик каналов распростране-

ния сигналов между источниками и приемниками сформирован специализированный массив океанологической информации для северо-западной части Японского моря. Массив включает все доступные данные организаций России, Японии, КНДР, Республики Корея и США. Это станции с батометрическими наблюдениями (с разреженной дискретностью по вертикали, которая равна или близка к стандартным горизонтам), а также STD-наблюдения, у которых более высокое разрешение по вертикали. Включены также наблюдения дрейфующих буев (Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer – PALACE). В сформированном массиве оставлены только океанологические станции с одновременными наблюдениями температуры и солёности, что позволяет рассчитывать скорость звука, которая является основной характеристикой ПЗК.

На первом этапе проводилась процедура исключения дублей станций, что неизбежно при обобщении массового материала наблюдений, взятого из различных источников. Затем отбраковывались недостоверные значения температуры и солёности с применением статистических методов и региональных особенностей выбранного полигона. После исключения дублирующей и недостоверной информации в результате океанографическом массиве осталось 23 247 станций, выполненных с 1925 по 2017 г.

На каждой океанографической станции проведена интерполяция значений температуры и солёности на горизонты, кратные 5 м. При обработке батометрических наблюдений использована линейная интерполяция значений. STD-наблюдения приводились на горизонты, кратные 5 м, с использованием медианной проце-

дуры (с захватом выше- и нижележащих наблюдений на расстоянии 10 м от расчётного). Затем на всех горизонтах производился расчёт скорости звука по формуле Чена–Миллера [13]. Используя эти значения, были построены вертикальные разрезы скорости звука, температуры воды и солёности.

Затем на всех станциях определялся горизонт с минимальными значениями скорости звука. Причем данный горизонт не мог быть последним на конкретной станции. На этом горизонте выбирались значения скорости звука, температуры воды и солёности. Далее за выбранный промежуток времени проводился расчет средних многолетних значений всех параметров в пределах трапеций $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ в направлении меридианов и параллелей. По этим данным выполнялось построение пространственных распределений глубины залегания ПЗК и скорости звука в нем, температуры воды и солёности в пределах полигона и вертикальных разрезов на выбранных трассах.

На рис. 1 представлено поле скорости звука на разрезе от внешней кромки шельфа до банки Кита-Ямато в период максимального прогрева поверхностных вод (с 15 августа по 15 сентября), которое иллюстрирует пространственные изменения глубины залегания ПЗК и скорости звука в нем.

Анализ показывает, что от внешней кромки шельфа до банки Кита-Ямато (на расстоянии до 300 км от мыса Гамова) скорость звука в ПЗК мало меняется (варьируя около 1455 м/с). Более того, на этой части трассы глубина залегания ПЗК медленно увеличивается в сторону моря от 150–200 до 250 м. Над возвышенностью Ямато (в зоне Полярного фронта) происходит существенный рост скорости звука (до 1458 м/с) и глубины положения ПЗК (до 400 м). Затем, в зоне Цусимского течения, глубина положения ПЗК и скорость звука в нем стабилизируются, составляя соответственно 400 м 1458 м/с.

На рис. 2 представлены средние многолетние пространствен-

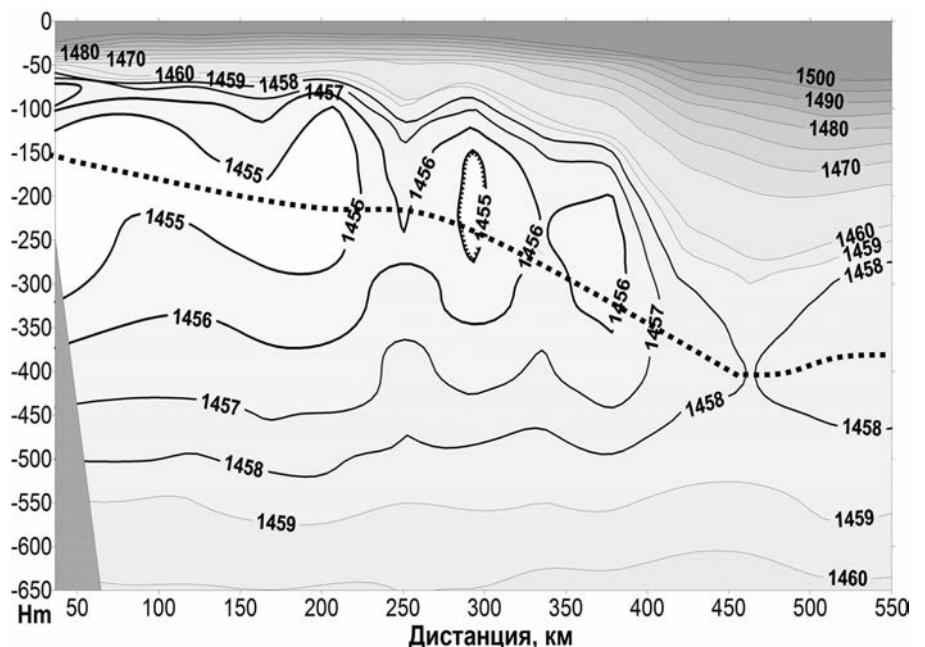


Рис. 1. Среднее многолетнее распределение скорости звука (м/с) на разрезе м. Гамова – возвышенность Ямато в августе–сентябре (дистанция – от м. Гамова). Мелким пунктиром обозначено примерное нахождение оси ПЗК по данным многолетних измерений

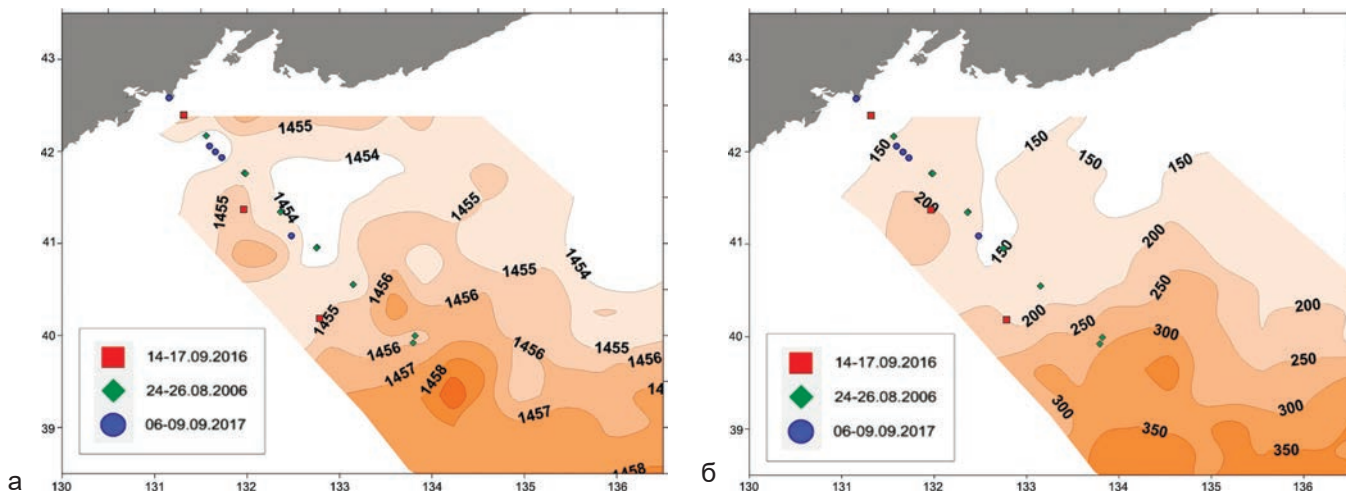


Рис. 2. Средняя скорость звука (м/с) на ПЗК (а) и глубина залегания (м) ПЗК (б) – по результатам многолетних данных и контрольных STD-измерений в летне-осенний период. Точками обозначены места проведения измерений STD в разные годы

ные распределения параметров ПЗК в пределах всего полигона в августе. Сравнение поля скорости звука на вертикальном разрезе (рис. 1) с характеристиками ПЗК, представленными на рис. 2, показало, что данные разреза хорошо отражают закономерности параметров ПЗК на всем полигоне.

Для оценки адекватности отражения климатическими данными акустической обстановки было произведено сравнение характеристик ПЗК, измеренных при проведении экспериментов в разные годы и месяцы, и полученных многолетних данных. На рис. 2, а, б точками обозначены места проведения измерений авторами статьи на океанологических станциях температуры и солености воды (скорости звука) в различные годы в летне-осенний период. На рис. 3 в верхней части приведены зависимости изменений скорости звука на оси ПЗК от расстояния, полученные экспериментально (звезды) и по многолетним данным (коричневые точки). Сравнение приведенных данных (рис. 2, а и 3) показывает, что значения скоростей звука на оси ПЗК на обеих зависимостях в основном расположены в пределах 1455–1456 м/с (точки на белом поле рис. 3 не рассматри-

вались). Это означает, что ошибка определения расстояния не будет превышать значений 150 м при позиционировании АНПА на расстоянии до 380 км. Очень важным обстоятельством является то, что на фоне стабильных значений скорости звука на оси ПЗК наблюдаются значительные (от 100 до 250 м) изменения глубин залегания оси ПЗК с расстоянием на обеих зависимостях (нижняя часть рис. 4). Это означает, что многолетние климатические данные в целом корректно описывают закономерности формирова-

ния и количественные характеристики ПЗК. Следовательно, они могут быть использованы при технической и методической реализации навигационного обеспечения АНПА в данном районе.

Таким образом, проведенный анализ показал, что включение в информационно-справочную систему многолетних гидрологических данных, полученных с применением представленной методики, может быть использовано при технической и методической реализации навигационного обеспечения АНПА в данном районе.

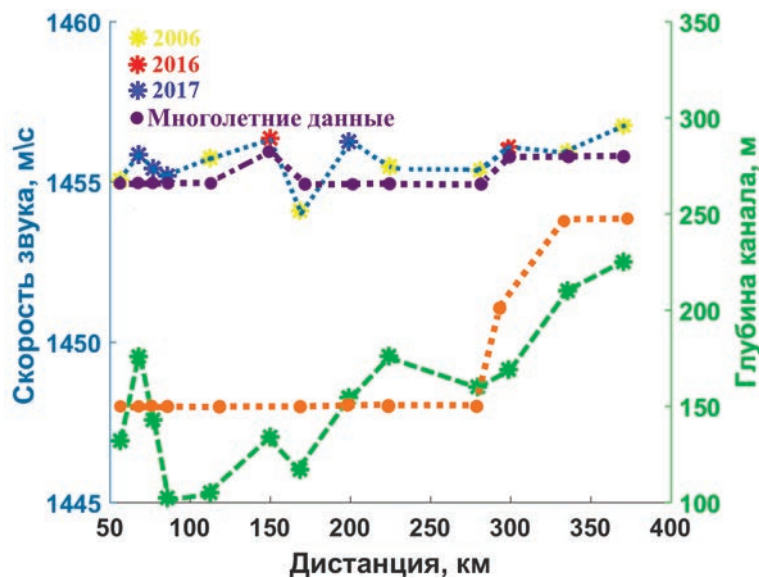


Рис. 3. Зависимости изменений скорости звука на оси ПЗК и глубины залегания оси от расстояния, полученные экспериментально и по многолетним данным

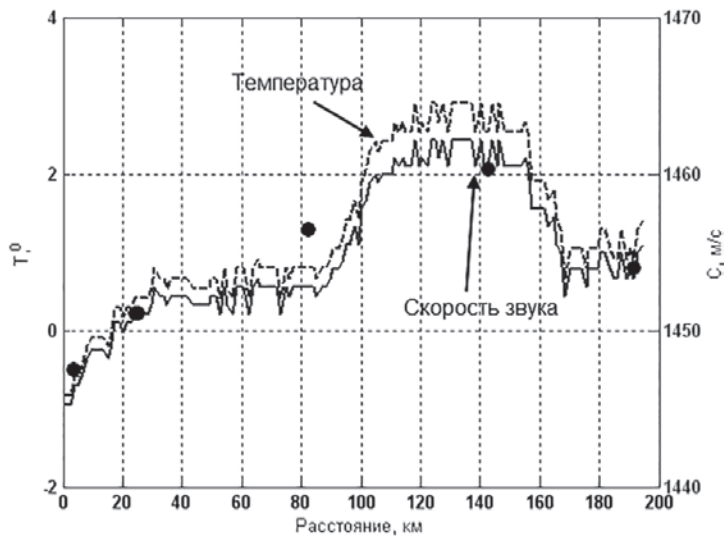


Рис. 4. Зависимости гидрологических измерений (точки) и спутниковых данных поверхностной температуры и скорости звука (кривые) от расстояния

■ Спутниковая океанология в задачах прогноза и измерения скорости звука в приповерхностном звуковом канале

Особенности распространения акустической энергии в зимние месяцы, связанные с формированием приповерхностного звукового канала (ППЗК) с осью вблизи поверхности моря, потребовали новых подходов к технической реализации измерений и прогнозов эффективной скорости звука при осуществлении позиционирования АНПА. В марте 2016 г. был проведен тестовый эксперимент по исследованию сравнимости подспутниковых гидрологических измерений с данными спутниковых наблюдений поверхностной температуры [14]. На рис. 4 точками обозначены значения измеренных STD-зондом приповерхностных значений скоростей звука в пяти точках на трассе протяженностью 200 км с наличием вихревого образования, которые хорошо соответствуют спутниковым данным (сплошные кривые), полученным с ИК изображений. При этом в работе было показано, что учет влияния вихря на расчет эффективной скорости звука на трассе позволил

существенно повысить точность измерения расстояния между ИНС и макетом приемного элемента АНПА.

Анализ полученного результата в этом эксперименте позволил включить в справочно-информационную систему методику применения данных спутниковых ИК изображений поверхностной температуры, которая легко пересчитывается в скорость звука. Предметный анализ спутниковых ИК изображений позволяет получить распределение поверх-

ностных температур (скоростей звука) на акватории района навигационного обеспечения АНПА или на акустических трассах, соединяющих ИНС с АНПА (рис. 5).

На рис. 5 приведены данные ИК снимка со спутника NOAA-18 на 28 марта 2018 г. и разрезы поверхностной температуры (скорости звука) для четырех 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 прибрежной зоне связаны с наличием более холодных вод на шельфе, а на расстояниях более 200 км сказывается влияние теплых водных масс в зоне фронтального раздела. 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 [14]. Можно также отметить сходство зависимостей, приведенных на рис. 5 (трасса 1) и 4 при ожидаемом незначительном повышении поверхностных температур

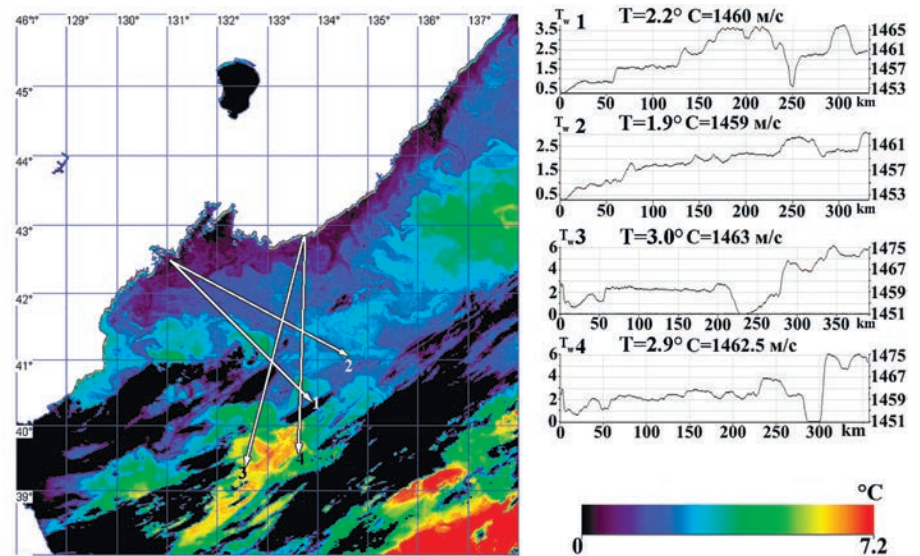


Рис. 5. Данные ИК снимка со спутника NOAA-18 на 28 марта 2018 г. и разрезы поверхностной температуры (скорости звука) для четырех трасс

в конце марта 2018 г. Это может свидетельствовать о стационарном характере вихревой системы в данном районе, а приведенные результаты подтверждают надежность и перспективность выводов о возможном применении спутниковых данных для повышения эффективности навигационных систем АНПА.

Таким образом, в разделе показано, что наличие у оператора на береговом посту управления АНПА (или группировкой АНПА) карты района с данными поверхностной температуры может обеспечить оперативный контроль над изменениями скорости звука в зоне функционирования

АНПА и, при необходимости, передавать эти данные на АНПА для корректировки расчетов координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование физических предпосылок и результатов экспериментальной апробации методик применения океанологических технических средств позволяет повысить точность и надежность навигационного обеспечения АНПА на удаленностях в сотни километров от береговых постов управления. На примерах экспериментальных результатов, полученных в Японском море, показано кроме

того, что использование в задачах дальнометрии многолетних океанологических данных и данных ИК изображений поверхностной температуры позволяет существенно повысить эффективность функционирования гидроакустических навигационных систем. Применение разработанной информационно-справочной системы может обеспечить прогноз, а в некоторых случаях и оперативный мониторинг гидрологической обстановки в районе функционирования АНПА. Это дает возможность реализовать позиционирование с ошибками, не превышающими сотые доли процента на расстояниях в сотни километров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Киселева Л.В. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
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 формирования 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 глубоком 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. АН. 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. АН. 2010. Т. 433, № 3. С. 394–396.
6. Пат. 2469346 С1, РФ. Способ позиционирования подводных объектов / Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.А., Голов А.А. – № 2011128643; заявл. 11.07.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
7. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Картавенко В.А. Телеметрический измерительный комплекс для акустико-гидрофизических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 110–114.
8. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Докл. АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
9. Chang K.I., Zhang C.I., Park C. et al. Oceanography of the East Sea (Japan Sea) [Электронный ресурс] // 1st edn. Springer Science + Business Media, New York. – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22720-7> (дата обращения: 03.09.2018).
10. Зуенко Ю.И. Межгодовые изменения положения полярного фронта в северо-западной части Японского моря // Изв. ТИНРО. 2000. Т. 127. С. 37–49.
11. Никитин А.А., Дьяков Б.С. Структура фронтов и вихрей в западной части Японского моря // Изв. ТИНРО. 1998. Т. 124. С. 714–733.
12. Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.G., Akulichev V.A., Morgunov Y.N., Acoustic Tomography for Monitoring the Sea of Japan: A Pilot Experiment // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2003. Vol. 28, No. 2. P. 297–302.
13. Chen C.T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures // Journ. of the Acoust. Soc. of America. 1997. Vol. 62 (5). P. 1129–1135.
14. Моргунов Ю. Н., Голов А.А., Лебедев М.С. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубоком море в зимних гидрологических условиях японского моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 6. С. 646–650.

