УДК 534.212

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЯПОНСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Д.Д. Каплуненко, В.А. Дубина, Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов

Оценка максимально точных значений горизонтальной и вертикальной скорости звука в морских и океанических бассейнах с целью точного позиционирования необитаемых движущихся подводных объектов в водной толще является одной из важнейших задач нескольких смежных областей морских наук – гидроакустики, спутниковой и классической океанологии. При этом получение решения задачи возможно только косвенным путем, через сбор информации о температуре и солености среды методами дистанционного зондирования и измерения in situ, с последующим моделированием и восстановлением отсутствующих данных. В данной работе показано, как может быть выполнено восстановление поля скорости звука с разрешением до 1 км за счет данных спутниковых наблюдений инфракрасного и видимого диапазонов и данных гидродинамического моделирования в районе северо-западной части Японского моря, включающей в себя район залива Петра Великого и фронтальную зону разделения системы течений в районе возвышенности Ямато. По результатам расчетов сделана оценка влияния на скорость звука изменчивости по температуре и солености в зависимости от их реальных значений, наблюдаемых для региона исследований. Данная постановка эксперимента позволяет в итоге оценить возможное сокращение ошибки позиционирования подводного аппарата, которое может возникать при использовании вышеуказанных наборов данных совместно. Метод восстановления скоростей звука применим в зимнее время, в отсутствие сезонного термоклина.

Ключевые слова: Японское море, спутниковые данные, поля скорости звука, коррекция скорости звука, радиометр NOAA AVHRR/3, гидродинамическая модель NEMO.

Введение

Повышение точности определения скорости звука на основе различных имеющихся данных наблюдений и их реанализа, которые определяют её косвенно (через соотношения температуры и солености морской воды) является сложной и актуальной задачей, предполагающей различные варианты решения, в зависимости от доступных данных. Уменьшение ошибки позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в данной работе выполняется за счет снижения ошибок определения скорости звука исходя из тех данных наблюдений, которые доступны для такого района в контактном (in situ) или дистанционном (спутниковые измерения, термометрия) виде. В данном случае мы рассматриваем использование спутниковых измерений температуры поверхности моря, как было уже выполнено

28 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2021. № 2 (36)

в [1], но с важными дополнениями и изменениями, которые вносятся за счет использования данных реанализа, полученных на основе гидродинамического моделирования. Температура воды дистанционными методами измеряется в среднем инфракрасном (ИК) (MWIR, длина волны 3–4 мкм) и тепловом ИК (TIR, длина волны 8–12 мкм) диапазонах электромагнитного спектра, а также на малых частотах (6–10 ГГц) микроволнового диапазона. Сенсоры установлены на спутниках, работающих на геостационарных и солнечно-синхронных приполярных орбитах.

Основные проблемы использования *ИК-диапазона* – облачность и коррекция влияния атмосферы (аэрозоли и водяной пар). Недостатки *микроволновых* измерений – низкое пространственное разрешение и влияние на интенсивность излучения шероховатости поверхности моря. Для многих акваторий Мирового океана наличие облачности ограничивает возможности использования спутниковых измерений в ИК-диапазоне. А пассивные микроволновые данные не удовлетворяют современным требованиям к пространственной и временной детализации карт температуры поверхности моря и вообще неприменимы в прибрежных районах (в полосе шириной 1–2 пикселя исходного растра яркостных температур, что может достигать 100 км).

Поэтому различные научные коллективы работают над проектами, результатом которых являются восстановленные разными способами пространственно-временные ряды температуры поверхности океана (ТПО) на основе методов оптимальной интерполяции и объективного анализа, где на входе используются все имеющиеся данные о температуре морской поверхности: in situ и спутниковые ИК и микроволновые измерения. Один из наиболее известных современных проектов в этой области – The Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSST), который ведётся в The Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO. DAAC) NASA и имеет международную поддержку [5, 15, 17]. Результатом реанализа, выполняемого в этом проекте, является суточная температура поверхности океана в узлах координатной сетки 0,009° (≈1 км). Пока такие продукты далеки от совершенства, поэтому в оперативной практике используют главным образом ТПО, восстановленную по ИК-измерениям.

При рассмотрении ИК-диапазона считается, что окно прозрачности атмосферы на длине волны 3,7 мкм является налучшим для наблюдения за морем. Излучение на этой длине очень чувствительно к изменениям поверхностной температуры. Температура легко измеряется, и окно более чистое, чем на частотах 8,5 и 11 мкм. Но на этой длине волны в суммарное принимаемое излучение существенный вклад вносит отражённая солнечная радиация. Поэтому для вычисления ТПО с использованием измерений на MWIR каналах берутся только ночные витки. Такие продукты называют «ночная TПО» [2].

Таким образом, регулярные измерения ТПО с достаточным для данной задачи пространственным и временным разрешением в любой точке Мирового океана при отсутствии облачности можно получать в тепловом ИК-диапазоне с приборов, установленных на полярно-орбитальных спутниках. Самой проверенной и востребованной технологией восстановления температуры поверхности океана является метод multi-channel SST, или «расщеплённого окна прозрачности» [3]. В этом методе используются измерения на двух длинах волн теплового ИК-диапазона. Существуют несколько разновидностей алгоритма [3], но его прообраз, выраженный в соответствующих уравнениях, разработан в начале 80-х годов для радиометра AVHRR/2 [3] и выглядит следующим образом:

$$SST = \alpha_1 + \alpha_1 T_4 + \gamma (T_4 - T_5),$$

где T_4 и T_5 – яркостная температура на соответствующих каналах, а коэффициенты определяются путём сравнения спутниковых температур с температурой, полученной *in situ* (с буёв и судов).

При построении полей ТПО по спутниковым ИК-данным, как правило, вначале применяется процедура фильтрации облачности, для которой используются измерения на других каналах, в том числе в видимом диапазоне. А затем уже рассчитывают попиксельные значения температуры воды. Но облака могут быть не видны алгоритмом фильтрации по двум причинам: если они меньше пространственного разрешения или очень прозрачны, как, например, alta cirrus.

Влияние атмосферы сказывается на значении не только ТПО, но и её градиента:

$$\nabla T_0 = t \nabla T_s,$$

где ∇T_s – это температурный контраст, ∇T_o – это контраст, регистрируемый со спутника и t – прозрачность атмосферы. Параметр t может варьировать в диапазоне 0,4–0,8 [2].

Восходящее инфракрасное и микроволновое излучение формируется тонкой поверхностной плёнкой толщиной менее 1 мм, известной как скин-слой. Поэтому температуру моря, восстановленную по спутниковым данным, часто называют скин-температурой, а ТПО, полученную in situ – балк-температурой (bulk). В условиях ветро-волнового перемешивания в океане формируется верхний однородный слой. Поскольку в модификациях мультиканального алгоритма расчёта ТПО коэффициенты настраиваются по измерениям с буёв и проходящих судов, считается, что алгоритм multi-channel SST характеризует температуру воды в среднем на глубине 0,5-2,0 м (примерный диапазон расположения термодатчиков на буях и судах 0,1-5,0 м [4]. В безоблачную штилевую погоду днём происходит сильный нагрев поверхностного слоя океана, а ночью за счёт радиационного выхолаживания – охлаждение. При сильном дневном прогреве в результате испарения скин-слой становится холоднее нижерасположенных вод.

Ошибки определения температуры воды по указанному алгоритму с использованием измерений радиометров AVVHR/3, установленных на метеорологических спутниках серии NOAA, оценивают в 0,3–0,5° [5]. В ходе выполнения данной работы были использованы ИК-измерения радиометров AVHRR/3, поступающие со спутников серии NOAA. В настоящее время на орбите функционируют спутники NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, NOAA-20 и Suomi/ NPP. За сутки навигационный район покрывается целиком, как правило, 6 раз тремя спутниками – ночным и дневными витками каждого аппарата. Время пролётов по Владивостокскому времени в районе 5, 7, 9 и 17, 19, 21 часов соответственно для спутников NOAA-19, 15, 18. Поскольку спутники работают на солнечно-синхронных орбитах, время съёмки по местному времени будет примерно одно и то же для любой акватории.

Спутники серии NOAA являются «метеорологическими», поэтому принимать информацию, полученную приборами, на них размещёнными, можно свободно, без существенных ограничений. Вся техническая документация, необходимая для получения и обработки данных (включая калибровочные коэффициенты), находится в свободном доступе.

Для получения полей скорости звука на основе спутниковых данных по температуре также необходимо иметь данные по солености, что позволяет выполнять расчет по формулам TEOS-10 [6]. Для этого нами был предложен метод согласования данных, полученных со спутников, и расчетных данных гибридной гидродинамической модели. В качестве такой модели, удовлетворяющей нас по пространственно-временному разрешению, была выбрана гидродинамическая модель NEMO [7–10].

Как модель, использующая ассимилированные данные, модель NEMO позволяет вычислять и прогнозировать состояние гидрологических характеристик, которые могут соответствовать присутствующим на полигоне условиям в момент проведения экспериментов.

Данная модель позволяет получать ежедневный прогноз по гидрологическим характеристикам на период до 10 дней с момента выдачи прогноза по всему земному шару на сетке с разрешением до 8 км (0.0083° на сетке, или ~30 секунд). На основе модельных данных были получены характеристики температуры и солености, а затем, на основании этих данных, были получены скорости звука на полигоне для трасс излучения по известным гидродинамическим уравнениям [11–13]. Согласно документации модели (Quality Information Document (QUID), документу о соответствии качества CMEMS_GLO_QUID_001_024 [14], прогнозы температуры и солености для диагностических данных находятся в пределах, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Несоответствия температуры и солености по от-
ношению к наблюдаемым данным (наблюдение-модель) для
версии модели 2.3 по значениям средних среднеквадратиче-
ских отклонений (северная часть Тихого океана, окраинные
MODE

moph)					
Глубина	Темпер	атура, °К	Соленость, ‰		
(слой), м	среднее	ср.кв. откл.	среднее	ср.кв. откл.	
0–5	-0.06	0.63	0.015	0.201	
5-100	-0.02	0.98	0.003	0.168	
100-300	-0.03	0.83	0.000	0.091	
300-800	-0.02	0.36	0.000	0.037	

В целом, по заявлению авторов, отклонения от измерений in situ не превышают 0.5°К по температуре и 0.1 ‰ по солености. В термоклине ошибки могут достигать 1 К и 0.2 ‰ соответственно. Модельные данные разделены на 50 дискретных вертикальных слоев от 1 м у поверхности до 450 м от дна и 22 слоев на уровне выше 100 м. Имеется возможность самостоятельного изменения количества слоев и ввода своих данных. Параметризация «частичных ячеек» [15] выбрана для лучшего представления топографического дна [11], при этом показатель адвекции импульса рассчитывается из схемы сохранения энергии и энтропии, предложенной Аракава [4] и Ламб [11]. Расчет трассеров (температуры и солености) выполняется по схеме полного исчезновения дисперсии (total variance diminishing, TVD) адвекции [15].

Выполненная нами экспериментальная работа относится к району залива Петра Великого в Японском море (по большей части, но и включая часть Центральной котловины до возвышенности Ямато, т.е. северо-западную часть Японского моря), для которого характерен субтропический и субарктический тип климата с присущими для них особенностями распределения температуры и солености, глубины залегания ПЗК. Данный район подвержен действию муссонов, что означает разделение типов погодных условий на зимний (холодный) и летний (теплый) периоды года с взаимообратным действием ветрового воздействия в районе развертывания системы. В холодный период года, в связи с выхолаживанием и отсутствием термоклина, поле температуры и скорости звука достаточно точно определяется вплоть до глубины залегания ПЗК методами контактного и дистанционного зондирования. Летом же, в связи с развитием сезонного термоклина в верхнем подповерхностном слое соленых вод, а также в связи с уменьшением количества безоблачных дней, необходимых для спутниковой съёмки в ИК-диапазоне поверхности моря, точность определения скорости звука в верхнем слое вод Японского и Охотского морей

уменьшаются, что требует отдельного рассмотрения возможностей коррекции ошибок в теплый сезон.

2. Оценка возможностей снижения ошибки позиционирования и основных факторов влияния

Пространственно-временное разрешение данных реанализа модели NEMO для Японского моря может учитывать среднесуточные характеристики на сетке с разрешением до 8 км. При этом спутниковый снимок температуры поверхности моря (ТПМ) фиксирует изменчивость на момент прохождения спутника за минимальный интервал времени, требуемый для выполнения снимка. Таким образом, при более низком влиянии на оценку скорости звука значений поля солености можно получить более точную оценку за счет комбинирования полей реанализа модели NEMO по солености со спутниковым снимком ТПМ. Следует отметить, что такая оценка будет максимально точна для северо-западной части Японского моря в холодный период года. В это время влияние термоклина на глубину залегания ПЗК минимально. Более подробно о достижимой возможности снижения погрешностей показано в разделах 3 и 4 данной статьи. Пример поля ТПМ, восстановленного по данным спутников NOAA, приведен на рис. 1.

3. Алгоритм снижения ошибки позиционирования

Снижение ошибки определения скорости звука может быть выполнено на основе выделения основных особенностей среды, в которых происходит распространение излучения. В данном случае, согласно информации об уравнении состояния морской воды [6], а также исходя из теории погрешности измерений, суммарная ошибка определения скорости звука будет находиться по следующей формуле:

$$C = C_0 + \alpha T + \beta S + \gamma P \rightarrow C = C_0 + \alpha T + \beta S + \gamma P, \quad (1)$$

где C_0 – истинное значение скорости звука, α – коэффициент пропорциональности воздействия значения температуры на скорость звука, β – коэффициент пропорциональности воздействия значения солености на скорость звука и γ – коэффициент пропорциональности воздействия значения давления на скорость звука. Предполагается, что звук распространяется в подводном звуковом канале (ПЗК) в виде лучей, которые за счет рефракции, отражаясь от поверхности и дна, стремятся к оси ПЗК. Коэффициентом γ можно пренебречь, так как в холодное время года звуковые лучи могут проходить от поверхности до дна, что делает данный компонент ошибки либо сложно вычисляемым, либо суммарно равным нулю.



Рис. 1. Температура поверхности моря, восстановленная по измерениям радиометра AVHRR со спутника NOAA 22 февраля 2019 г. 10:14 Влд.

Таким образом, значимые погрешности возникают из-за изменений температуры и солености в пределах расстояний, на которых находятся приемник и излучатель. Основываясь на ранее проведенных экспериментах, подробно изложенных в [1, 17], полагаем, что для характеристики скорости в ПЗК возможно использование спутниковых данных высокого разрешения. Может быть использован поверхностный скин-слой, в котором измеряется температура. Это справедливо для холодного периода года, когда при эксперименте в границах исследуемого полигона термоклин фактически отсутствует. Из данных гибридной гидродинамической модели NEMO используется слой глубиной 0.5 м как наиболее близкий к получаемому на основе спутниковых данных. В показанной на рис. 1 области Японского моря для гидрологических полей в данных пределах имеем следующие величины параметров (на 22 февраля 2019 г.):

$$\Delta T = \{-1, 7 \div 6.7 \mathcal{C}\}, \ \Delta S = \{32 \div 35\%\},$$

$$\Delta P = \{0 \div 350 dBar\}.$$
 (2)

Температура обусловлена зимним периодом и наличием льда в акватории [18]. Для определения того, как коэффициенты α и β влияют на изменения скорости звука, нам достаточно построить несколько решений для уравнений скорости звука в морской воде [6] и на основании полученных решений определить величины влияния этих коэффициентов. На рис. 2 выполнено построение кривых зависимости скорости звука от температуры при различных значениях солености (4 диапазона, 32–35).

В результате проведенных экспериментов установлено, что, к примеру, при солености в 34 ‰, любое изменение солености на 1 ‰ приведет к изменению скорости звука 1.364 м/с. При этом изменение температуры на 1 °С приведет к изменению скорости на 4.358 м/с. Таким образом, влияние температуры на скорость звука примерно в 3 раза выше, чем солености. Данные результаты исследований идентичны полученным в летнее время в результате экспериментов [19] и показывают, что характер соотношений примерно одинаков независимо от времени года и соотношения параметров. Таким образом, в нашем случае можно считать, что главными факторами, определяющим изменчивость скорости звука, являются температурные аномалии, поэтому, для восстановления горизонтальных полей скорости звука возможно использование более точных данных по температуре совместно с менее точными данных по солености – более низкого разрешения и с большей ошибкой. Более подробно о том, насколь-



Рис. 2. Зависимость скорости звука от температуры при различных значениях солености и расчетные коэффициенты влияния α и β

ко такой подход может повлиять на точность оценок при позиционировании, будет показано в разделе 4.

Сами коэффициенты α и β определяются на основании формул:

$$\beta = \frac{\Delta C}{\Delta S} = \left\lfloor \frac{M / ce\kappa}{\%} \right\rfloor,\tag{3}$$

$$\alpha = \frac{\Delta C}{\Delta T} = \left[\frac{M / ce\kappa}{^{\circ}\mathsf{C}}\right],\tag{4}$$

исходя из соотношений, указанных на рис. 2.



Рис. 3. Температура поверхности моря по данным спутника NOAA за 22 февраля 2019 г. Трасса м. Шульца – возв. Ямато показана черной пунктирной линией



Рис. 4. Термохалинные характеристики верхнего слоя воды 0.5 м согласно данным модели NEMO для температуры (а) и солености (б) за 22 февраля 2019 г.

Анализ результативности метода для типичных условий холодного времени года был выполнен на трассе м. Шульца – возв. Ямато по данным за 22 февраля 2019 года. Температура, зафиксированная по спутниковым данным для этого дня, приведена на рис. 3.

Затем по модельным данным NEMO были определены суточные средние значения температуры и солености для данного региона (рис. 3). На рис. 4 показаны поля температуры и солености для данного района.



Рис. 5. Поверхностные поля скорости звука по данным NEMO (а) и гибридного происхождения NEMO+NOAA (б) за 22 февраля 2019 г.

Учитывая то, что менее точное определение солености может меньше влиять на точное вычисление скорости звука, нежели температура, представляется разумным для целей повышения точности позиционирования использовать гибрид поля солености модели NEMO и поверхностной температуры спутника NOAA в случаях, когда это возможно по погодным и техническим соображениям. Такой подход показан на рис. 5, где для сравнения даны поля скорости звука в поверхностном слое, полученные по данным NEMO и NEMO+спутник NOAA.

Согласно рис. 4, а очевидно, что гибридные данные позволяют точнее выделять аномалии скорости звука, возникающие в пределах акустической трассы и могущие влиять на изменение скорости звука.

4. Общие замечания по применению метода

Согласно полученным данным профиль скорости звука, определенный по более точным данным, за которые в эксперименте приняты гибридные данные NOAA+NEMO, отличается в среднем от модельных данных по трассе в 330 км на 0,93 м/с. Таким образом, при наличии достаточно качественного спутникового изображения температуры и модельных данных по солености существует теоретическая



Рис. 6. Профили скорости звука вдоль трассы м.Шульца – возв. Ямато за 22 февраля 2019 г. по данным модели NEMO (черная кривая, Модель NEMO) и по гибридным данным спутников NOAA и модели NEMO (красная кривая, NEMO+NOAA)

возможность улучшения точности не менее чем на 0,95 м/с на 300 км для позиционирования АНПА в холодный период года на акватории, где выполняется миссия АНПА. Профили скоростей, которые можно



Рис. 7. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по акустической трассе м. Шульца – возв. Ямато. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

Дата: 2019-04-02

Температура на трассе ТПО – 0.5 м глубины





Температура на трассе ТПО – 0.5 м глубины

Дата: 2019-03-15



Рис. 9. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по акустической трассе м. Лихачева - м. Шульца Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

получить на основе данных модели NEMO и по гибридным данным, показаны на рис. 6.

Для выяснения возможных пределов применения методики была проведена серия экспериментов, в которых сравнивалась температура, полученная по спутниковым данным, и модельная на глубине 0,5 м на границе теплого и холодного сезона (до и после возникновения термоклина). Данные до возникновения термоклина – за 15 марта 2019 г., после возникновения – за 2 апреля 2019 г. Использовалось несколько трасс, основные из которых приведены на рис. 7–10. Данные трассы находятся как в шельфовой зоне залива Петра Великого вдоль и поперек шельфа, так и распространяются через Центральную котловину до возвышенности Ямато, что в совокупности позволяет получить более репрезентативную выборку для анализа результатов использования метода в северо-западной части Японского моря на трассах с различными характеристиками по скорости звука и расстоянию приема и передачи сигналов.

Разность температур (в 80 % случаев) в оценках по трассе варьируется в пределах от 0,1 до 0,7 градусов Цельсия, что может быть вызвано причинами, связанными с погодными условиями и различным характером формирования сравниваемых характеристик. Для определения возможной ошибки позиционирования объекта (например, АНПА) при нашем методе необходимо знать скорость звука и ошибку, с которой она определяется на акустической трассе. Использование гибридной оценки скорости звука, составленной на основе спутниковой ТПМ и модельной солености, позволяет нам вывести среднеквадратическую ошибку определения скорости звука за счет ее сравнения с данными модели, имеющими более грубое временное разрешение. Согласно исследованным зависимостям, это соответствует изменению скорости звука в пределах 0,43-3,05 м/с на 230 км (устранение ошибки в диапазоне 65.93-467.67 м в позиционировании объекта) или 0,19-1,32 м/с на 100 км (устранение ошибки в диапазоне 12,67-88 м в позиционировании объекта). Данные экспериментов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Возможности снижения ошибки при корректировке данных по скорости звука комбинированным методом

Дистанция,	Скорость звука, м/с	Снижение ошибки
КМ	(корректировка)	позиционирования, м
100	0,19 - 1,32	12,67 - 88
230	0,43 - 3,05	65,93 - 467,67



Рис. 10. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по трассе м. Лихачева – точка в 100 км от м. Шульца по направлению к возв. Ямато. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой Таким образом, метод совместного использования спутниковых снимков видимого диапазона и данных гибридной гидродинамической модели NEMO в холодный период года позволяет снижать ошибку определения скорости звука для данного региона Японского моря в сложных случаях при наличии мезомасштабных вихревых образований. На сегодняшний момент остается открытым вопрос по улучшению метода снижения ошибки в летний период. Для решения этого вопроса предполагается в дальнейшем провести исследование совместного использования дополнительных данных от разных гидродинамических моделей, использующих данные реанализа и спутниковую информацию для построения характеристик водных масс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С., Тагильцев А.А. Особенности формирования интерференционной структуры скалярно-векторных звуковых полей на шельфе Японского моря // Доклады академии наук. 2018. 480. С. 1–4.

2. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. 12. С. 5–30.

3. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Голов А. А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. 64. С. 191–196.

4. Arakawa A., Lamb V.R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations // Mon. Weather. Rev. 1981. Vol. 109. P. 18–36. – https://www.aos.wisc.edu/~aos718/arakawaandlamb80.pdf

5. Barton I.J., Prata A.J. Satellite derived sea surface temperature data sets for climate applications // Adv. in Space Res. 1995. 16(10). P. 127–136.

6. Gilles G., Aksenov Y., Blockley E., Chevallier M., Feltham D., Fichefet Th., Holland P., Iovino D., Madec G., Massonnet F., Ridley J., Rousset C., Salas D., Schroeder D., Tietsche St., Vancoppenolle M. N. S. (2018). Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI³) – The NEMO Sea Ice engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1471689. – https://forge.ipsl.jussieu. fr/nemo/chrome/site/doc/SI3/manual/pdf/SI3 manual.pdf

7. Aumont O., Éthé Ch, Lovato T., Mouchet A., Nurser G., Palmiéri J., Yool A. N.E.M.O. T.O.P. Working. Tracers in Ocean Paradigm (TOP) – The NEMO Tracers engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.1471700. – https:// forge.ipsl.jussieu.fr/nemo/chrome/site/doc/TOP/manual/pdf/TOP manual.pdf

8. Gurvan M., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clementi E., Coward A., Ethé, Samson, G. NEMO ocean engine. NEMO ocean engine. Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.3878122. – https://zenodo.org/record/1472492

9. Haidvogel D.B., Beckman A. Numerical ocean circulation modeling. London: Imperial College Press, 1999. 320 p.

10. IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific use. Doorwerth. Netherlands: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2009.

11. IAWPS. Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamics Properties of Seawater. Berlin: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2008.

12. Lellouche J-M., Legalloudec O., Regnier C., Levier B., Greiner E., Drevillon M. NEMO Quality Information Document CMEMS_GLO_ QUID_001_024. Tulouse: COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service. – http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf 2019.

13. Kosheleva, A., Lazaryuk, Y., Yaroshchuk, I. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone // Vol. 24. P. 005001. 2015 . doi:10.1121/2.0000109. - https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0000109

14. Lévy M., Estublier A., Madec G. Choice of an advection scheme for biogeochemical models // Geophys. Res. 2001. Lett., 3725-3728. doi:10.1020/2001GL012947

15. McClain E.P., Pichel W.G., Walton C.C. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures // J. Geophys.. Res., 1985. 90, 11587–11601.

16. Millero F.J., Feistel R., Wright D.G., McDougall T.J. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale // Deep-Sea Res. I, 2008. 55, 50–72.

17. Steward R.H. Methods of satellite oceanography. University of California press, 1985.

18. Bourdallé-Badie R., Bell M., Chanut J., Clementi E., Coward A., Drudi M., Éthé Ch., Iovino D., Lea D., Lévy C., Madec G., Martin N., Masson S., Mathiot P., Mocavero S., Müller S., Nurser G., Samson G., Storkey D. N.E.M.O. System NEMO ocean engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) // 2017. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1464816. – https://forge.ipsl.jussieu.fr/nemo/chrome/site/doc/NEMO/manual/pdf/NEMO_manual.pdf

Об авторах

КАПЛУНЕНКО Дмитрий Дмитриевич, к.г.н., старший научный сотрудник лаборатории физической океанологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: геофизическая гидродинамика, моделирование глобальной циркуляции, дальневосточные моря России

Тел.: +7 (423) 231-3087, факс +7 (423) 231-2573

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

- ДУБИНА Вячеслав Анатольевич, к.г.н., заведующий лабораторией ледовых исследований
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: физическая океанография, дистанционное зондирование земли

Тел.: +7 (423) 234-0873, факс +7 (423) 231-2573

E-mail: dubina@poi.dvo.ru

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, д.т.н., заведующий отделом гидроакустики и технический средств исследования океана, заведующий лабораторией акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика, гидрофизика Тел.: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ГОЛОВ Александр Александрович, к.т.н., научный сотрудник лаборатории акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43 Область научных интересов: акустическая томография, гидро-

акустика, звукоподводная связь, подводная навигация **Тел.**: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573 **E-mail**: golov alexander@inbox.ru

Для цитирования:

Каплуненко Д.Д., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н., Голов А.А. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЯПОНСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2(36). С. 28–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_03.

