

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАССИВОВ МНОГОЛЕТНИХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ОПОРНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА НА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАССАХ В ОХОТСКОМ МОРЕ

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

Представлена многоуровневая методика расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море, которая базируется на использовании всей доступной океанологической информации с 1929 по 2020 г. и опорных гидроакустических сигналах. На основе многолетних массивов океанологических данных выявлены сезонные и межгодовые особенности формирования полей скорости звука в море, а также правила группировки и обработки исходных данных на акустических трассах. Разработано прогностическое уравнение (с заблаговременностью не менее 2 месяцев) для предсказания типа («теплый», «нормальный», «холодный») термического режима вод холодного подповерхностного слоя Охотского моря, в котором формируется подводный звуковой канал. В качестве предикторов прогностического уравнения используются межгодовые вариации климатических индексов атмосферы и океана, а также межгодовые изменения локальных параметров в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши, Тихого океана и Японского моря. Реализация методики существенно уменьшает погрешность расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах по данным океанологических наблюдений. Ее использование будет наиболее востребовано в бортовом компьютере автономного подводного объекта, выполняющего миссию на сравнительно обширном полигоне с существенно изменяющимися гидрологическими условиями и значениями эффективной скорости звука на акустических трассах.

Ключевые слова: температура воды, эффективная скорость звука, подводный звуковой канал, океанологические данные, сезонная и межгодовая изменчивость.

Введение

Решение задачи позиционирования подводных объектов (ПО) с заданной точностью зависит от прогноза эффективной скорости звука в районе навигационного обеспечения (РНО). Это особенно актуально в случаях ограниченных гидрологических данных (отсутствие справочных или модельных данных, оперативной информации о параметрах звукового канала в местах размещения ПО и источников навигационных сигналов (ИНС)).

Корректная оценка дальности между ИНС и ПО возможна только при наличии наиболее точных значений скорости распространения звука (известных

или прогнозируемых) вдоль акустических трасс. Для этого необходимо выявить региональные особенности распространения звука в придонном звуковом канале на шельфе, в подводном звуковом канале (ПЗК) глубокого моря в теплый период года и приповерхностном звуковом канале (ППЗК), формируемом в зимний сезон.

Одним из основных фундаментальных научных результатов, определяющих методику расчета эффективной скорости звука на акустических трассах, является открытие акустического «оползня» (фокусировка акустической энергии в придонном слое на шельфе, переход ее на ось ПЗК в глубоком море и распространение с минимальным затуханием на

большие расстояния). Это явление было зафиксировано американскими специалистами [1] вблизи Гавайских островов и затем подтверждено в работе [2] для гидрологических условий Японского моря.

В Охотском море ПЗК формируется вблизи ядра холодного подповерхностного слоя (ХПС), положение которого в теплый период года на глубоководной акватории Охотского моря, как правило, не выходит за пределы горизонтов 75–100 м. В прибрежных районах моря ХПС выделяется как придонный слой, а положение его ядра здесь зависит от глубин на подходах к берегу.

Режимные особенности ХПС Охотского моря (пространственная изменчивость глубины залегания его ядра, температуры воды в нем, а также особенности межгодовых изменений) основывались на гипотезе, согласно которой аномалии температуры воды формируются в основном в осенне-зимнее время [3–9]. При этом, как правило, авторы исходили из предположения о противодействии и межгодовых вариациях двух основных термодинамических процессов осенне-зимнего периода: адвекции сравнительно теплых тихоокеанских вод в море и выхолаживающего эффекта осенне-зимней конвекции.

Цель настоящей работы состоит в оценке влияния сезонной и межгодовой изменчивости гидрологических и акустических параметров в подповерхностных водах Охотского моря на точность расчета эффективной скорости звука на акустических трассах. В качестве объектов исследований определены режимные особенности формирования полей скорости звука в Охотском море, методические подходы по подготовке и обработке многолетних массивов океанологических данных, а также правила группировки и обработки исходных данных на акустических трассах.

■ Используемые массивы океанологических данных

Для подготовки массива океанологических данных Охотского моря были использованы все доступные данные глубоководных наблюдений (батометрические серии, STD-наблюдения, данные дрейфующих буев (Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer – PALACE), батитермографные (МВТ) наблюдения и данные отрывных зондов (ХВТ)). Два последних вида наблюдений дают только профили температуры воды. В представленных наборах данных присутствуют станции с батометрическими наблюдениями (с разреженной дискретностью по вертикали, которая равна или близка к стандартным горизонтам), а также батитермографные,

ХВТ, STD-наблюдения и данные дрейфующих буев, у которых более высокое разрешение измеряемых параметров по вертикали. Источники данных – мореведческие организации России (ВНИИГМИ–МЦД, ДВНИГМИ, ГС ТОФ, ТИНРО-Центр, ТОИ ДВО РАН), США (NODC-NOAA) и Японии (JODC).

В первую очередь была проведена процедура исключения дублей станций, что неизбежно при обобщении массового материала наблюдений, взятого из различных источников. Затем отбраковывались недостоверные значения характеристик с применением статистических методов и региональных особенностей исследуемой акватории.

После исключения дублирующих станций и недостоверной информации в результирующем океанографическом массиве Охотского моря осталось 129 846 станций, выполненных с 1929 по 2020 г. Однако станций с одновременным определением температуры и солёности, что необходимо для расчета скорости звука в морской воде, оказалось несколько меньше – 101 618. Следует отметить, что в зимнее время на акватории Охотского моря выполнено сравнительно небольшое число наблюдений (как правило, на акватории западнее и севернее островов Курильской гряды). Это связано с наличием льда на большей части моря, а также с суровыми метеорологическими условиями (низкая температура воздуха, большие скорости ветра и обледенение). Недостаточно данных также до 1950 года.

На всех станциях выполнена интерполяция параметров на горизонты, кратные 5 метрам, а затем на каждой океанологической станции была рассчитана скорость звука и определен горизонт ПЗК (горизонт с минимальной скоростью звука на станции). Затем на этом горизонте были выбраны значения температуры, солёности и скорости звука.

■ Методология расчета эффективной скорости звука в ПЗК на трассах

В настоящей работе реализован (в виде программ для операционных систем семейств «Windows» и «Linux») следующий алгоритм расчета эффективной скорости звука на конкретных трассах, который включает в себя следующие этапы вычислений.

1. Формируется (или выбирается из существующих) специализированный массив океанологических данных с параметрами ПЗК, на основании которого будут проводиться вычисления. Отметим, что в процессе вычислений одновременно можно использовать как один, так и несколько наборов данных.

2. Вводятся начальные параметры конкретной трассы (координаты излучателей и приемников акустических сигналов, расстояние между узлами трассы, размеры областей «захвата» исходных данных и период выбора данных).

3. Проводится предварительное осреднение исходных данных по дате и относительному местоположению станций в пределах областей, относящихся к конкретному узлу обобщения данных (для минимизации вклада данных микрополигонов и многосекционных станций). Для этого группируются станции, расположенные рядом и выполненные в одни календарные сутки.

4. В каждом узле конкретной трассы производится осреднение рассчитанных на предыдущем этапе суточных значений и данных единичных станций. Расчет средних значений в узлах трассы выполняется выбранным методом осреднения по всем станциям, попадающим в область осреднения узла трассы (возможен расчет среднего арифметического или медианного значения).

5. На заключительном этапе определяется эффективная скорость звука между излучателем и приемником сигнала (как среднее взвешенное значение, учитывающее расстояние между узлами и средние значения в узлах трассы).

■ Первое приближение методики расчета эффективной скорости звука с использованием только многолетних массивов океанологических данных

Этот вариант применяется в случаях, когда имеется ограниченный массив исходных данных. К настоящему времени существует большое количество информационных ресурсов для формирования океанологических глубоководных массивов данных. Однако они, как правило, не всегда достаточны для исследования параметров ПЗК не только в холодный, но и в теплый периоды года. Все это не позволяет более полно исследовать пространственно-временные особенности распределения параметров ПЗК на уровне, необходимом для более точного расчета эффективных скоростей звука на акустических навигационных трассах.

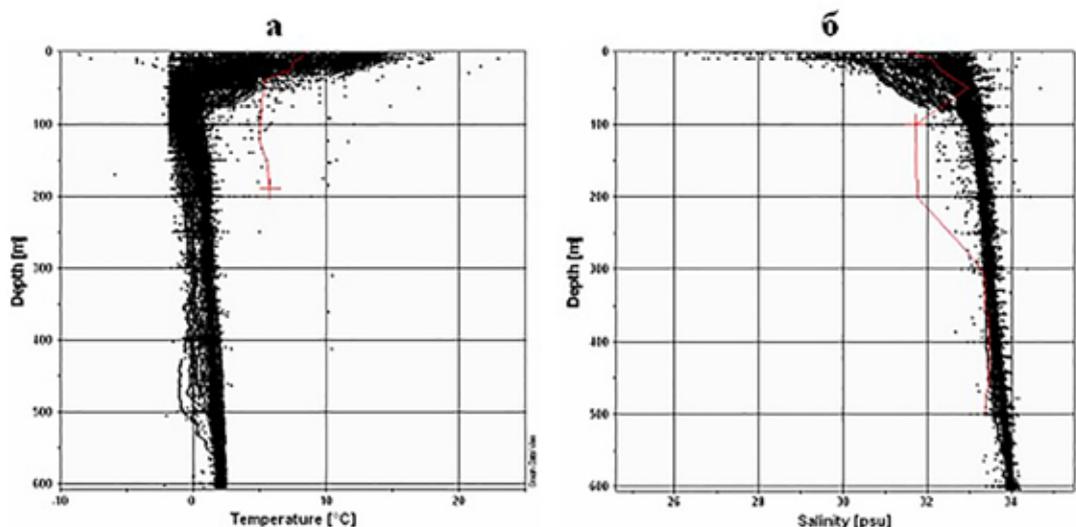
Предлагаемый вариант расчета эффективной скорости звука на трассах может быть использован также в случаях, когда имеются только общие представления о вертикальном распределении температуры воды и скорости звука на исследуемой акватории. Более того, недостаточно исследована изменчивость характеристик вод различных масшта-

бов (от короткопериодной до межгодовой), не проработан в должной мере вопрос о горизонтах среднего многолетнего положения ПЗК в отдельных регионах исследуемой акватории и временной изменчивости его параметров (глубины положения, температуры и солёности морской воды, а также скорости звука в ядре ПЗК).

Отметим, что в данном варианте расчета эффективной скорости звука на трассах предполагается достаточно высокое качество исходной океанологической информации. Практика использования океанологических данных показывает, что во всех мировых центрах данных имеется много станций с недостоверной информацией, как на отдельных горизонтах наблюдений, так и в пределах всего профиля конкретной станции (даже если на станции по конкретному элементу наблюдений стоит флаг «хорошее значение»). Это связано с тем, что в центрах сбора информации, как правило, проводится оценка данных только по физическим пределам конкретных элементов наблюдений. Например, для температуры воды (основной параметр, влияющий на скорость звука) диапазон изменений при присвоении флага «хорошее значение» составляет от -2 до $+40$ °С (причем вне зависимости от горизонта наблюдений). Таким образом, если предварительно не была проведена «чистка» исходных данных на конкретных станциях, то в условиях ограниченного набора информации при расчетах можно получить существенные погрешности эффективной скорости звука на трассах, так как изменение температуры воды на 1 °С приводит к изменению скорости звука примерно на 4 м/с. В качестве примера на рис. 1 приведены данные по температуре и солёности, заимствованные для ограниченного района Охотского моря (49 – 54 ° с.ш.; 144 – 150 ° в.д.) с электронного ресурса [10].

Следующее необходимое требование к массивам исходной океанологической информации – это удаление из них мелководных станций. Источники навигационных сигналов (как стационарные, так и находящиеся на заякоренных судах) в нашем случае располагаются на придонных горизонтах, где глубина места их постановки не превышает 30 – 50 м. Вертикальное распределение температуры воды (и скорости звука) в Охотском море свидетельствует о наличии в весенне-летний период года прогретого (с высокими значениями скорости звука) верхнего квазиоднородного слоя. Его вертикальная протяженность в основном не превышает 10 – 20 м. Под этим слоем располагается слой сезонного термоклина, где наблюдается резкое падение температуры воды и скорости звука (с минимумом на придонных гори-

Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воды (а) и солёности (б) в локальном районе Охотского моря



зонтах). Поэтому при подготовке исходного массива данных и исключения влияния мелководных станций при расчетах эффективной скорости звука в ПЗК на трассах исследуемой акватории необходимо удалить из исходного массива данные океанологических станций на локальных акваториях с глубинами менее 30 м.

Опыт работы с океанологическими данными в Охотском и Японском морях свидетельствует о том, что поиск минимальных значений скорости звука на станциях конкретных массивов данных и, следовательно, глубины залегания ПЗК необходимо производить разными алгоритмами для станций в глубоком море и на шельфе. Для этого исследуемая акватория должна быть разделена на две части: мелководную (с глубинами менее 100 м) и глубоководную. Соответствующий алгоритм для поиска параметров ПЗК выбирается с помощью обращения программы к предварительно подготовленным координатам границ шельфа выбранного полигона. Главное отличие алгоритмов заключается в том, что минимальное значение на последнем горизонте станции в глубоком море не учитывается, в отличие от шельфа.

Затем на конкретных станциях выполняется поиск горизонтов, на которых скорость звука равна минимальному значению. Несколько подряд идущих горизонтов с минимальным значением скорости звука заменяются одним горизонтом (с осреднением глубины положения ПЗК). Для найденного горизонта с минимальным значением скорости звука на станции определяется его положение в списке горизонтов. Если он последний в списке и станция находится в глубоком море, он игнорируется и не сохраняется. Если он последний в списке и станция находится на шельфе, он сохраняется в файл результатов. Если в

глубоком море он предпоследний в списке, а расстояние между ним и последним горизонтом больше заданного предела для этой глубины, он игнорируется и не сохраняется. Сформированный таким образом специализированный массив станций с параметрами ПЗК исследуемой акватории используется затем при расчетах эффективной скорости звука на акустических трассах. На каждой станции данного массива обязательно должна быть следующая информация: дата, время, координаты, глубина положения ПЗК, а также значения температуры, солёности и скорости звука в нем.

Практические расчеты в Охотском и Японском морях свидетельствуют о том, что временной масштаб обобщения исходной информации при расчете эффективных значений скорости звука на трассах должен быть не менее 1 месяца (± 15 суток от даты, на которую дается гидрологический прогноз). Диаметр области «захвата» данных (при расчете средних значений в каждом расчетном узле глубоководного участка трассы) должен быть не менее 110 км в Охотском море и 55 км в Японском море. Предлагаемые размеры для областей осреднения информации, во-первых, связаны с пространственно-временной неоднородностью исходной информации (чтобы не было пропусков данных в отдельных узлах трассы). Во-вторых, эти довольно крупные области осреднения позволяют сгладить отдельные «выбросы» в исходных данных, которые, как правило, связаны с недостаточной «чисткой» исходной информации, а также с наличием разномасштабной изменчивости (от короткопериодной до межгодовой). Поэтому при ограниченном наборе данных на результат расчета средних значений в каждом узле трассы возможно существенное влияние как погрешностей измерений,

так и вклада аномальных значений параметров, связанных с разномасштабной изменчивостью.

В Охотском море на шельфовых (мелководных) участках трасс, протяженностью 50–60 км от источников акустических сигналов, 5–7 областей «захвата» данных должны быть в форме эллипсов с горизонтальными размерами осей от 30×15 до 50×25 км (с постепенным их увеличением в направлении к приемнику сигналов). Причем большая ось эллипсов должна располагаться параллельно или по касательной к изобатам на этом участке шельфа. Такие формы и размеры областей «захвата» данных необходимы для уменьшения влияния на результаты расчетов прибрежных мелководных станций, на которых скорость звука на придонных горизонтах существенно выше, чем в ПЗК на остальной части трассы. Аналогичные формы областей «захвата» данных и ориентацию их больших осей относительно изобат необходимо также применять для трасс с направлением вдоль или по касательным к изобатам на мелководных участках исследуемых акваторий.

■ Уточнение методики расчета эффективной скорости звука на основе многолетних массивов океанологических данных и межгодовой изменчивости параметров ПЗК

В настоящем разделе представлена методика для исследования межгодовой изменчивости параметров

ПЗК на исследуемой акватории (с предсказанием наиболее вероятных сценариев формирования термических и акустических условий на конкретных полигонах), а также подготовки соответствующих массивов данных для расчетов эффективной скорости звука конкретных трасс Охотского моря.

Ранее в работах [4, 11] была рассмотрена межгодовая изменчивость температуры воды в ХПС Охотского моря, и в рамках предложенной классификации была проведена типизация лет на «теплые», «нормальные» и «холодные». Критерием для «нормальных» лет был принят следующий диапазон значений температуры: среднее значение ряда $\pm 0.674\delta$, где δ – стандартное отклонение ряда. Годы, которые выходили за пределы «нормы», относились соответственно к «теплым» или «холодным».

На основе выполненной типизации были сформированы три массива океанологических данных – «холодных», «теплых» и «нормальных» лет. Затем, основываясь на сформированных массивах только «холодных» и «теплых» лет, были представлены особенности средних многолетних месячных пространственных распределений температуры воды Охотского моря на горизонте 100 м, который отражает особенности распределения температуры воды вблизи ядра ПЗК (рис. 2). Анализ пространственных распределений температуры, представленных на этом рисунке, показал, что при различных типах режима достаточно четко различаются размеры обла-

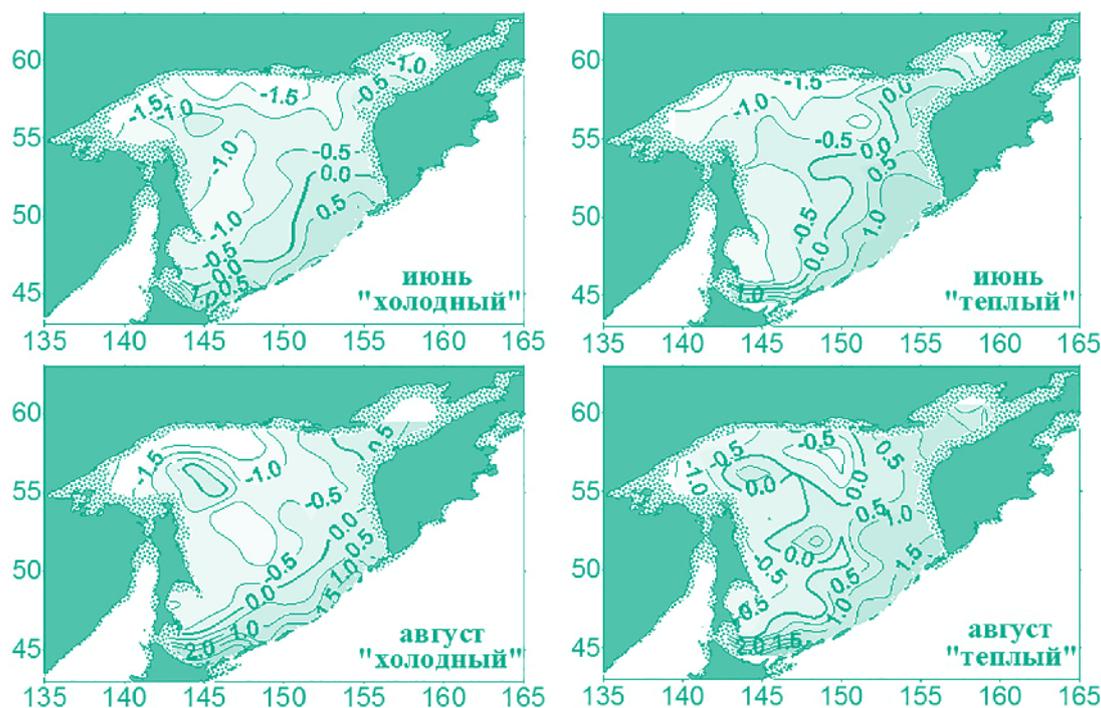


Рис. 2. Средние многолетние типовые распределения температуры воды (°C) на горизонте 100 метров в Охотском море

стей, которые заполнены водными массами с температурой ниже 0 °С. Разность значений температуры в отдельных частях моря (между «холодными» и «теплыми» типовыми гидрологическими состояниями) на горизонте 100 м достигает 0.5–1.0 °С.

Новые результаты исследования межгодовой изменчивости температуры воды в ХПС основываются на существенно дополненном массиве океанологических данных, включающем 129 846 станций, за период с 1929 по 2020 г. Анализ базы данных показал, что океанологических станций, выполненных в холодный период года в Охотском море, очень мало. На основе этой информации невозможно дать оценку межгодовой изменчивости термического состояния вод всего моря в холодный период года (период максимального охлаждения верхнего слоя вод и максимального развития зимней конвекции). Особенно это актуально для обширного шельфа, который в зимний период покрыт льдом. Из предшествующих работ известно [4, 7, 11, 12], что особенности распределения температуры воды на подповерхностных горизонтах, сформированные в зимний период, сохраняются длительное время (по июль–август). Хорошо выраженный слой сезонного термоклина препятствует поступлению тепла от поверхности моря на подповерхностные горизонты. Поэтому термический режим ХПС зависит в основном от метеорологических условий предшествующей зимы, особенностей динамики вод в пределах моря и адвекции тепла течениями. Сезонный прогрев поверхностных вод в весенне-летний период, как правило, не распространяется глубже 20–30 м. Поэтому данные океанологических наблюдений за период с марта по август в подповерхностном слое вод можно использовать для исследования межгодовой изменчивости термического состояния ХПС Охотского моря.

Для оценки межгодовых изменений термического состояния вод ХПС Охотского моря использованы аномалии температуры воды за март–август в трапециях размером 2×2 градуса. Отметим, что в настоящее время на исследуемой акватории нет даже сравнительно небольших областей, для которых имелся бы непрерывный пакет информации за последние 50–70 лет. Поэтому восстановление пропусков в массивах аномалий температуры воды выполнено процедурой, изложенной ранее в [4, 11]. После выполнения всех этапов восстановления пропущенных значений выполнялось разложение средних за март–август аномалий температуры воды ХПС по естественным

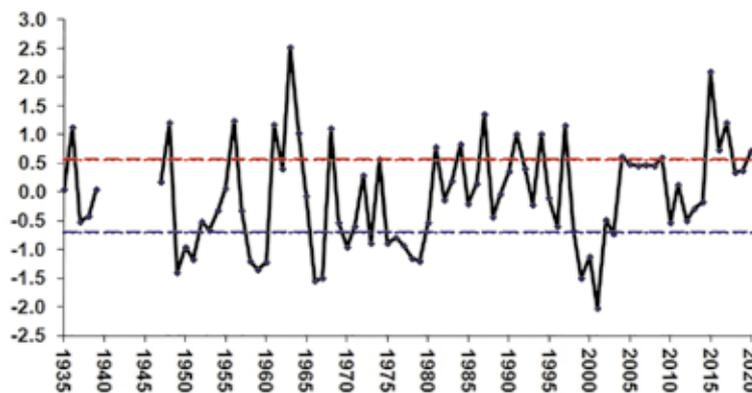


Рис. 3. Межгодовая изменчивость термического состояния вод ХПС Охотского моря (красные и синие пунктирные линии ограничивают диапазон «нормальных» лет)

ортогональным функциям (ЕОФ). Анализ межгодовой изменчивости термического состояния вод ХПС проведен по данным вклада только первой компоненты разложения по ЕОФ (рис. 3), вклад которой отражает синхронные колебания в пределах Охотского моря. Типизация лет на «теплые», «нормальные» и «холодные» выполнялась по данным временного ряда, приведенного на рис. 3. Было получено, что «нормальные» годы находятся в диапазоне значений аномалий температуры воды в ХПС от -0.70 до +0.57°С. Годы, которые выходили за пределы «нормы», относились соответственно к «теплым» или «холодным».

Результаты, полученные по существенно дополненному массиву многолетних океанологических наблюдений с 1935 по 2020 г., свидетельствуют о том, что в Охотском море на глубинах локализации оси ПЗК термические условия год от года могут измениться существенно. Предполагается также, что и поля параметров ПЗК в Охотском море могут в конкретный год значительно меняться. В связи с этим были построены средние многолетние месячные поля скорости звука в ПЗК отдельно по массивам «холодных» и «теплых» лет (рис. 4). Представленные на рис. 4 поля скорости звука свидетельствуют о том, что в «холодные» по термическим условиям годы на акватории от берегов Сахалина до меридиана 150° в.д. значения скорости звука в ПЗК находятся в пределах 1440–1444 м/с. В то время как в «теплые» по термическим условиям годы они возрастают до 1444–1448 м/с.

Основываясь на результатах, представленных на рис. 4 и сформированных массивах данных для «холодных», «нормальных» и «теплых» лет, были проведены расчеты эффективной скорости звука в ПЗК на предполагаемых трассах полигона в Охот-

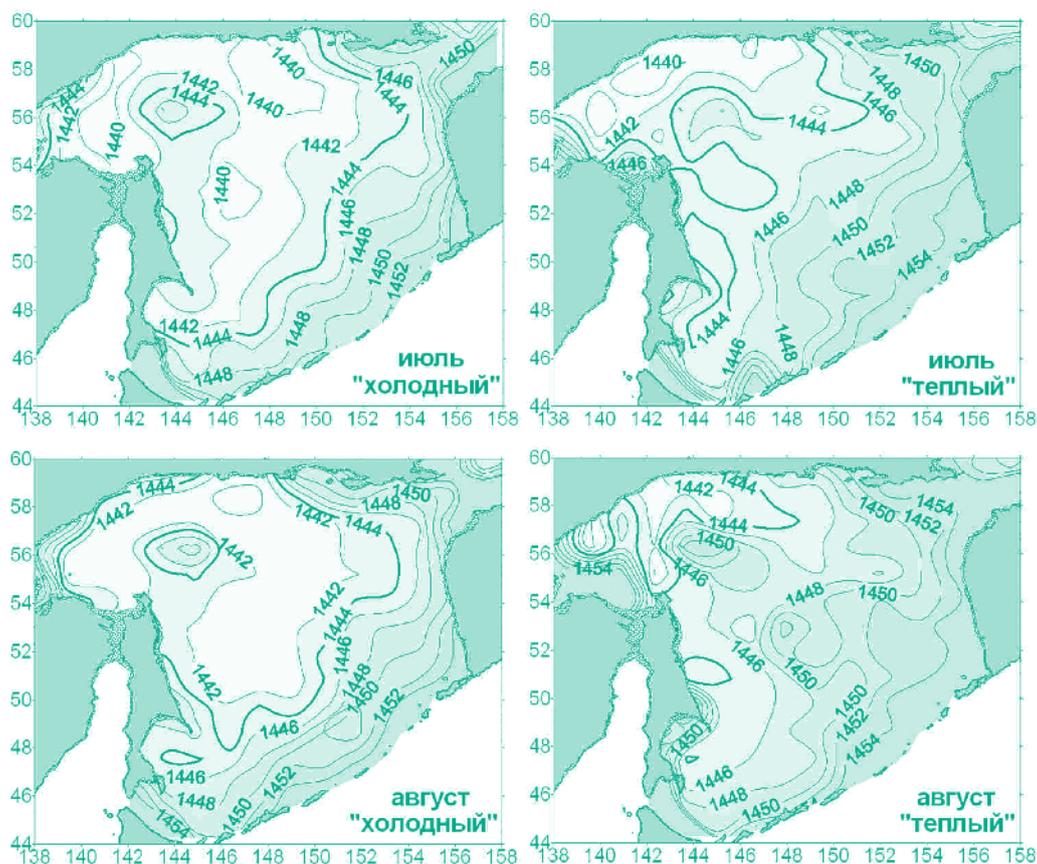


Рис. 4. Средние многолетние типовые распределения скорости звука (м/с) в ПЗК на акватории Охотского моря, построенные по массивам «холодных» и «теплых» лет

ском море (ограниченном параллелями мысов Елизаветы и Терпения). Начальные точки трасс (пункты излучения акустических сигналов) находились вблизи мыса Терпения (48.64695 с.ш.; 144.8289 в.д.) и у мыса Елизаветы (54.41242 с.ш.; 142.8209 в.д.). Приемники сигналов находились в глубоководной части моря с удалением от излучателей примерно на 300 км (51.69053 с.ш.; 145.3149 в.д.) и 500 км (52.1759 с.ш.; 149.3958 в.д.). Результаты расчетов представлены в табл. 1, из которой следует, что в разные по термическим условиям годы эффективная скорость звука на трассах в Охотском море может различаться существенно (в «теплые» и «холодные» годы на трассах 300 и 500 км до 2.2 и 5.4 м/с соответственно).

Представленные в табл. 1 результаты свидетельствуют о возможности существенного улучшения прогноза эффективной скорости звука на трассах по гидрологическим данным при использовании в расчетах типовых массивов данных. Однако в реальной практике экспедиционных экспериментов и выполнения специальных миссий на конкретных полигонах, как правило, отсутствует оперативная глубоководная океанологическая информация, которая бы помогла оценить тип сформировавшихся гидрологических условий конкретного года.

В связи с этим реализована задача разработки прогноза типа термического режима на горизонтах локализации ПЗК в Охотском море. Для этого были сформированы ряды предикторов, возможно, влияю-

Таблица 1. Эффективная скорость звука в ПЗК на трассах в Охотском море при использовании многолетних массивов океанологических данных с 20 июля по 20 августа

Тип термического состояния вод Охотского моря	Эффективная скорость звука в ПЗК на трассах			
	м. Терпения – 300 км	м. Терпения – 500 км	м. Елизаветы – 300 км	м. Елизаветы – 500 км
Средний многолетний (все данные)	1443.494	1443.556	1444.96	1443.954
Многолетний «нормальный»	1443.285	1443.287	1445.908	1444.138
Многолетний «холодный»	1442.926	1440.923	1442.831	1441.467
Многолетний «теплый»	1444.349	1446.226	1445.04	1446.907

щих на изменения термического режима Охотского моря. Также проведен корреляционный анализ этих рядов с параметром, характеризующим временные вариации термического режима Охотского моря, представленным на рис. 3.

Значимые корреляционные связи были получены между параметром, характеризующим термическое состояние вод ХПС Охотского моря, и West Pacific teleconnection index (WP), а также локальными индексами, характеризующими состояние прилегающих районов суши и деятельного слоя прилегающих акваторий Японского моря и северо-западной части Тихого океана [13]. К ним относятся зимняя температура воздуха на метеорологических станциях Аян, Охотск и Магадан, а также 7 массивов средних месячных зимних значений температуры воздуха над прилегающими к Охотскому морю районами Азиатского материка с различными пространственными масштабами осреднения данных. Также значимые корреляционные связи получены для пяти локальных регионов, характеризующих зимние средние месячные значения температуры поверхности океана. Один из них расположен западнее пролива Лаперуза и характеризует межгодовую изменчивость термического состояния вод Японского моря, поступающих в южную часть Охотского моря. Четыре региона располагаются восточнее центральных и северных проливов Курильской гряды и отражают межгодовую изменчивость тихоокеанских вод, поступающих в Охотское море. Также значимые корреляционные связи получены с межгодовой изменчивостью протяженности лучей (их схема приведена в работе В.В. Плотникова [14]). Данные о кромке ледяного покрова получены с ресурса [15].

На основе полученных данных корреляционного анализа был сформирован массив возможных предикторов для составления уравнения прогноза полей параметров ПЗК в Охотском море. При формировании уравнения прогноза типа («холодный», «нормальный», «теплый») все ряды возможных предикторов были обработаны методом пошагового регрессионного анализа. В результате было получено прогностическое уравнение (обучаемая выборка которого получена по данным за период с 1961 по 2015 г.), характеризующее гидрологическое состояние ХПС Охотского моря в теплый период года. Данное уравнение имеет следующий вид:

$$Atw = -0.003 \cdot L_6 + 0.826 \cdot P_1 + 0.102 \cdot P_2 + 0.018 \cdot P_3 + 0.002 \cdot L_{12} - 0.25 \cdot WP + 0.64 \cdot P_4 + 0.189 \cdot P_5 + 3.829$$

где Atw – аномалия температуры воды ХПС Охотского моря; L_6 – средняя протяженность луча № 6

(с последней декады февраля по последнюю декаду марта); P_1 – средняя температура воды в марте для четырех районов, расположенных к востоку от центральных и северных проливов Курильской гряды; P_2 – средняя за декабрь–февраль температура воздуха в регионе севернее ГМС Аян; P_3 – средняя за январь–март температура воздуха в районе 60–70° с.ш. и 140–160° в.д.; L_{12} – средняя протяженность луча № 12 (с последней декады февраля по последнюю декаду марта); WP – среднее значение индекса WP (West Pacific teleconnection index) за январь–март; P_4 – средняя температура воздуха в районе Сибирского максимума за январь–март; P_5 – средняя за январь–февраль температура воды на поверхности в районе к западу от пролива Лаперуза (схема расположения предикторов представлена на рис. 5).

Проведенные расчеты по представленному уравнению на независимом периоде (2016–2020 г.) показали, что все прогнозы оправдались. Полученные результаты временных изменений термических условий, а также результаты прогнозирования свидетельствуют о применимости предложенного прогностического уравнения для предсказания возможного сценария формирования термического режима в подповерхностных водах Охотского моря в весенне-летний период.

В связи с этим предлагаются следующие этапы для расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в ПЗК Охотского моря по уточненной методике:

- подготавливаются входные параметры для прогностического уравнения, по результатам которого и предложенным пределам аномалий температуры воды в ХПС для «нормальных лет» (от -0.70 до +0.57°C) определяется тип развития термических условий в ПЗК Охотского моря («холодный», «нормальный» или «теплый»);
- для расчетов выбирается соответствующий тип океанологического массива с использованием имеющейся дополнительной информации (с соответствующей «чистой» исходной информацией);

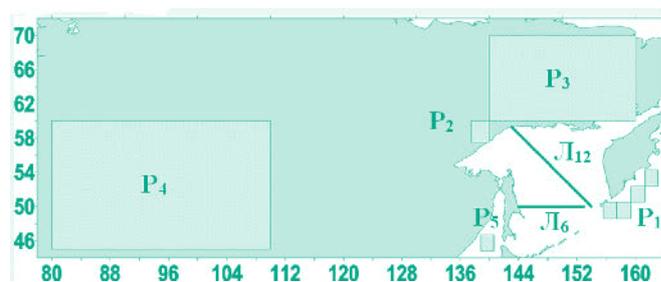


Рис. 5 Схема расположения регионов для расчета предикторов прогностического уравнения

– на заключительном этапе производится расчет эффективной скорости звука на выбранных трассах локального региона Охотского моря.

Отметим также, что при проведении расчетов необходимы все технологические процедуры, изложенные в предшествующем разделе настоящей работы.

■ Уточнение методики расчета эффективной скорости звука на основе многолетних массивов океанологических данных, а также межгодовой и сезонной изменчивости параметров ПЗК

Представленная выше уточнённая методика расчета эффективной скорости звука на акустических трассах так же имеет недостатки, которые связаны с пространственно-временной неоднородностью имеющегося массива данных и с недостаточным учетом межгодовой и сезонной изменчивости гидрологических и акустических параметров. Даже в пределах одного типового массива присутствует информация, существенно отличная (в ту или иную сторону) от средних многолетних значений. Более того, временной промежуток обобщения информации (месяц) также сравнительно велик. Это не исключает случаев преобладания (при формировании наборов данных конкретных трасс) информации, полученной на начало либо на конец периода обобщения информации. К дополнительным факторам, также вносящим погрешности в рассчитываемые параметры конкретного года, можно отнести наличие теплых либо холодных вихревых образований разного масштаба. Перечисленные недостатки существующих на настоящее время массивов океанологических данных приводят к определенным погрешностям при расчете эффективной скорости звука на конкретных трассах. Все это настоятельно требует проведения контрольных океанологических и акустических наблюдений непосредственно перед началом экспедиционных экспериментов или специализированных миссий.

Для учета межгодовой и сезонной изменчивости параметров ПЗК (в расчетах эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море) предлагается следующий сценарий, включающий несколько этапов подготовительных работ.

1. Вначале проводятся все действия, предлагаемые в предшествующих методических разработках по выбору и подготовке соответствующего массива данных (по результатам расчетов по прогностическому уравнению).

2. Перед началом проведения эксперимента в ключевых районах полигона (в точках излучения и

приема акустических сигналов, а также вблизи границы шельфа каждой трассы) выполняются гидрологические наблюдения. Вертикальное распределение параметров (температуры воды и скорости звука) сравнивается со средними многолетними профилями, рассчитанными по выбранному массиву данных. По результатам сравнения делается заключение о совпадении или различии параметров термического режима конкретного года (по отношению к средним многолетним данным). Следует подчеркнуть, что конкретные наблюдения только в исключительных случаях могут совпасть со средними многолетними данными. Как правило, они могут только свидетельствовать о более теплом либо холодном режиме конкретного года.

3. Далее учитываются следующие результаты исследований. Выполненный ранее анализ средних многолетних месячных полей показал, что в теплый период года (с мая–июня по август–сентябрь) на акватории Охотского моря, как правило, наблюдается рост скорости звука в ПЗК. Эту закономерность подтверждают также графики, приведенные на рис. 6 с использованием всей имеющейся океанологической информации. На представленных на рис. 6 трассах излучатели находятся у мысов Елизаветы и Терпения, а приемники расположены на удалении от них на 300 и 500 км. Все эти трассы располагаются в пределах ядра холода, находящегося в глубоководной части моря восточнее Сахалина [8]. На рис. 6 по горизонтальной оси представлено время опережения/запаздывания (в днях) относительно условной

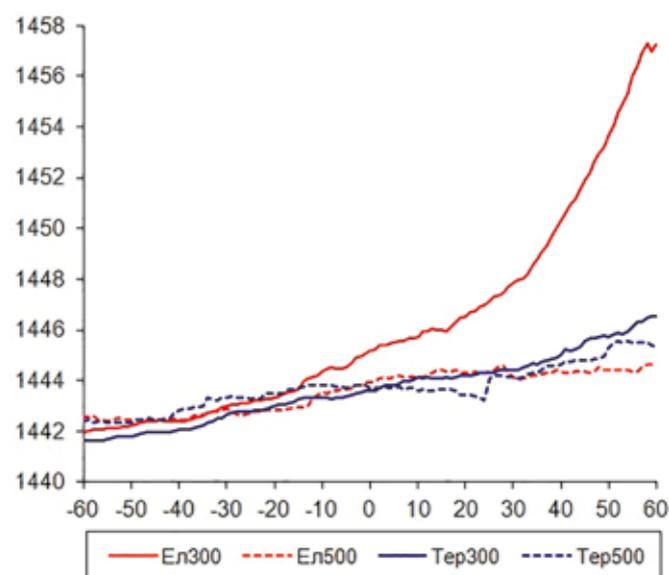


Рис. 6. Изменения эффективной скорости звука на трассах в Охотском море с различными смещениями (в днях) от даты эксперимента

даты проведения экспериментальных работ (5 августа). Представленные графики свидетельствуют, что эффективная скорость звука в ПЗК Охотского моря в течение теплого периода, как правило, имеет тенденцию роста.

Таким образом, выполнив ряд расчетов (со смещением с определенной дискретностью относительно известной даты проведения эксперимента), мы получим для каждой трассы массив сравнительно пониженных или повышенных значений эффективной скорости звука. В табл. 2 представлены рассчитанные значения эффективной скорости звука на трассе м. Елизаветы – 300 км с использованием всей имеющейся океанологической информации.

На заключительном этапе нужно будет сравнить полученные гидролого-акустические наблюдения конкретного года с результатами расчетов с разными смещениями. Минимальная погрешность между оперативными гидролого-акустическими наблюдениями и разными вариантами расчетов по исторической базе данных позволит использовать наиболее близкие к реальным значения эффективной скорости звука на трассах.

В этом случае в памяти компьютера подводного объекта (помимо внесения неизменных данных, например, координаты точек излучения сигналов, параметры трасс и т.д.) включается команда использования массива данных соответствующего типа («нормальный», «холодный» или «теплый»), а также основанное на конкретных наблюдениях текущего года временное смещение относительно текущей даты.

Если полигон работы подводного объекта большой и будут проводится даже единичные корректировочные океанологические измерения, то корректировку расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах, выполняемых автономным подводным объектом, можно будет производить одной командой смены временного смещения относительно текущей даты.

Проведено сравнение значений эффективной скорости звука, полученных по гидрологическим и акустическим данным, на трассах в южной части Охотского моря. Начальная точка трасс (пункты излучения акустических сигналов) находилась вблизи мыса Терпения (49.20797 с.ш. и 144.4321 в.д.). Приемники сигналов находились в глубоководной части моря с удалением от излучателей примерно на 300 км (47.4746 с.ш. и 147.463 в.д.) и 500 км (47.18762 с.ш. и 150.3922 в.д.).

Выполненное сравнение показало, что значения эффективной скорости звука на представленных трассах, полученные по всем имеющимся на настоящее время гидрологическим данным и в рамках первого приближения предлагаемой методики, отличались от акустических данных на 1.2-1.4 м/с. С учетом времени распространения акустического сигнала от излучателя до приемника (на трассах протяженностью до 500 км) средняя невязка определения дистанции составляет около 440 м.

В то же время использование соответствующих на конкретный год массивов многолетних океанологических данных и предлагаемой методики с учетом межгодовой и сезонной изменчивости параметров

Таблица 2. Эффективная скорость звука (м/с) на трассе м. Елизаветы – 300 км с различными сдвигами (в днях) относительно 5 августа

Излучатель	Приемник	Дата	Сдвиг	Все данные
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/06/2021	-60	1441.705
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/16/2021	-50	1442.136
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/26/2021	-40	1442.276
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/06/2021	-30	1442.454
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/16/2021	-20	1443.077
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/26/2021	-10	1443.618
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/05/2021	0	1444.960
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/15/2021	10	1445.706
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/25/2021	20	1445.870
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/04/2021	30	1446.857
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/14/2021	40	1447.594
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/24/2021	50	1451.334
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	10/04/2021	60	1454.713

ПЗК снижает погрешности расчета эффективных скоростей звука на трассах в южной части Охотского моря до 0.05–0.15 м/с. В этом случае средняя невязка определения дистанции не превышает 100 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы пространственные особенности распределения, а также сезонная и межгодовая изменчивость гидрологических и акустических параметров в подповерхностном слое вод Охотского моря. Выявлены закономерности (с использованием всех доступных данных глубоководных океанологических наблюдений за 1929–2020 г., а также опорных гидроакустических сигналов), позволившие представить уточненную методику расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море. Методика формирования и обработки многолетних массивов океанологических данных, а также правила группировки и обработки исходных данных позволяют существенно уменьшить погрешность

расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах по данным океанологических наблюдений. Предполагается, что использование исторической океанологической информации будет наиболее востребовано в бортовом компьютере автономного подводного объекта, выполняющего миссию на сравнительно обширном полигоне с существенно изменяющимися гидрологическими условиями и значениями эффективной скорости звука в ПЗК на акустических трассах.

Работа выполнена по госбюджетной тематике ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: ААА-А-А20-120031890011-8) и «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов» (регистрационный номер: 121021700346-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111, No. 2. P. 757.
2. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Дубина В.А., Лучин В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // *Подводные исследования и робототехника*. 2018. № 2 (26). С. 49–54.
3. Жигалов И.А., Лучин В.А. Межгодовая изменчивость температуры придонных вод на шельфе западной Камчатки // *Метеорол. и гидрол.* 2005. № 10. С. 72–80.
4. Лучин В.А., Жигалов И.А. Межгодовые изменения типовых распределений температуры воды в деятельном слое Охотского моря и возможность их прогноза // *Изв. ТИНРО*. 2006. Т. 147. С. 183–204.
5. Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea-particularly in regard to cold waters // *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.* 1973. Vol. 9. P. 45–77.
6. Фигуркин А.Л. Развитие океанологических условий западной Камчатки по данным мониторинговых наблюдений 1997 и 2000 гг. // *Изв. ТИНРО*. 2002. Т. 130. С. 103–116.
7. Фигуркин А.Л. Изменчивость термохалинного состояния придонных вод северной части Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2011. Т. 166. С. 255–274.
8. Чернявский В.И. Изменчивость ядра холода и прогноз типа термического режима на севере Охотского моря // *Океанологические основы биологической продуктивности северо-западной части Тихого океана*. Владивосток, 1992. С. 104–113.
9. Luchin V.A., Zhigalov I.A., Plotnikov V.V. The Interannual Variability of the Water Temperature of the Okhotsk Sea // *PICES Sci. Rep.* 2004. No. 27. P. 27–29.
10. World Ocean Database Select And Search [Электронный ресурс] // NOAA National Centers For Environmental Information: [сайт]. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html> (дата обращения: 10.04.2021)
11. Лучин В.А., Матвеев В.И. Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2016. Т. 187. С. 205–216.
12. Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря : моногр. М. : Наука, 1966. 70 с.
13. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series [Электронный ресурс] // NOAA Physical Sciences Laboratory: [сайт]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (дата обращения: 10.04.2021).
14. Плотноков В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
15. NASA Worldview: [сайт]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 10.04.2021)

Для цитирования:

Лучин В.А., Голов А.А., Шешегов А.В., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАССИВОВ МНОГОЛЕТНИХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ОПОРНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА НА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАССАХ В ОХОТСКОМ МОРЕ // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 2(36). С. 4–17. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_01.

Об авторах

ЛУЧИН Владимир Александрович, д.г.н., ведущий научный сотрудник

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

Научные интересы: океанографические массивы данных, пространственно-временная изменчивость океанографических параметров

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

Тел.: +7 (423) 231-26-29

E-mail: vluchin@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-4136-302X

ГОЛОВ Александр Александрович, к.т.н., старший научный сотрудник

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

Научные интересы: акустическая томография, гидроакустика, звукоподводная связь, подводная навигация

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

Тел.: +7 (423) 231-14-00

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

ORCID ID: 0000-0002-7160-0076

ШЕШЕГОВ Андрей Викторович, программист

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

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

Тел.: +7(423)231-26-29

E-mail: tt6b24@mail.ru

ДУБИНА Вячеслав Анатольевич, к.г.н., заведующий лабораторией

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

Научные интересы: спутниковая океанология, спутниковая метеорология

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

Тел.: +7 (904) 627-12-14

E-mail: dubina@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-3273-8977

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, д.т.н., заведующий лабораторией

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

Научные интересы: Акустика океана, акустическая навигация, акустическая дальнометрия, звукоподводная связь, акустическая томография

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

Тел.: +7 (423) 231-16-31

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-1961-1915

