

УДК 534.231.2, 551.46.065

DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.23

**ОСОБЕННОСТИ  
ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ  
СКОРОСТИ ЗВУКА ПОД  
ВЛИЯНИЕМ ТАЙФУНОВ НА  
ШЕЛЬФЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ  
(ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО)**

А.Н. Самченко, И.О. Ярощук,  
А.В. Кошелева, А.А. Пивоваров,  
А.Н. Швырев

*Тихоокеанский океанологический институт  
имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток,  
Россия*

samchenko@poi.dvo.ru

**FORMATION SPECIFICITY OF  
SOUND VELOCITY FIELD UNDER  
INFLUENCE OF TYPHOONS ON  
THE SHELF OF THE SEA OF  
JAPAN (THE PETER  
THE GREAT BAY)**

Aleksandr N. Samchenko, Igor O. Yaroshchuk,  
Aleksandra V. Kosheleva,  
Aleksandr A. Pivovarov, Aleksey N. Shvyrev  
*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute  
FEB RAS, Vladivostok, Russia*

samchenko@poi.dvo.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты гидрологических исследований на шельфе залива Петра Великого Японского моря в июле – августе 2012, июле – августе 2017, августе 2019 и августе 2021 годов. Пространственная изменчивость полей температуры и скорости звука, характерная для региона, проанализирована по результатам гидрологических CTD-зондирований и долговременных измерений заякоренными вертикальными термогирляндами. В ходе измерений было зарегистрировано прохождение тайфунов Болавен (28–29 августа 2012 года), Нору (7–8 августа 2017 года), Кроса (16 августа 2019 года), Мирина (7–9 августа 2021 года), Лупит (8–9 августа 2021 года), Омаис (10–11 августа 2021 года) у побережья Приморья Российской Федерации. Показано значительное изменение гидрологической ситуации в заливе под воздействием экстремальных внешних факторов. В спокойных метеорологических условиях в заливе наблюдается до трех слабовыраженных термоклина, расположенных на глубинах 8–15 м, 30–35 м и 45–60 м. Во время прохождения тайфунов три термоклина объединяются в один мощный на глубине примерно 50–60 м, а в некоторых случаях термоклин с большим градиентом находился на глубинах 30–40 м.

**Abstract.** The paper presents the results of hydrological studies which we carried out on the shelf of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan in July – August 2012, July – August 2017, August 2019 and August 2021. We have analyzed spatial variability of temperature and sound velocity fields, peculiar to the region, on the basis of hydrological CTD-data and the results of long-term measurements with anchored vertical thermostrings. In the course of measurements, we registered the following typhoons during their passage off the coast of the Primorsky Territory of Russia: Bolaven (August 28–29, 2012), Noru (August 7–8, 2017), Krosa (August 16, 2019), Mirinae (August 7–9, 2021), Lupit (August 8–9, 2021), Omais (August 10–11, 2021). A significant change in the hydrological situation in the bay under the influence of extreme external factors is shown. Up to three mild thermoclines are observed in the bay in calm meteorological conditions. Its are located at depths of 8–15 m, 30–35 m, and 45–60 m in some cases, a thermocline with a large gradient was located at depths of 30–40 m. The temperature difference in the thermocline formed under the influence of typhoons was approximately 12–15°C per 10 m of depth. Apparently, the intensification of waves and surge of heated surface water in the Peter the Great Bay, caused by strong southerly and southwesterly winds, lead to the appearance of a

Перепад температуры в термоклине, сформированным под действием тайфунов, составил примерно 12–15°C на 10 м глубины. По-видимому, усиления волнения и нагон прогретой поверхностной воды в заливе Петра Великого, вызванные сильными южными и юго-западными ветрами, приводят к появлению ярко выраженного придонного подводного звукового канала. Поскольку такие изменения влияют на распространение акустических сигналов, их особенно важно исследовать при работе с автономными подводными объектами, осуществлении их позиционирования и связи с ними.

**Ключевые слова:** термоклин; термогирлянды; гидрологические исследования; STD-зондирование; подводный звуковой канал; тайфун; залив Петра Великого.

### Введение

В мировой практике изучение воздействия тайфунов на шельф имеет важное значение в связи с увеличением интенсивности и частоты их проявлений<sup>1</sup>[Emanuel, 2005; Webster et al., 2005], поскольку происходит активное освоение и использование шельфовой зоны при поиске и добыче полезных ископаемых, прокладке коммуникаций, для нужд рыбной промышленности и марикультуры. Из-за влияния тайфунов на гидрологическую ситуацию на шельфе происходит увеличение биологической активности [Chen-Tung et al., 2003]. Для изучения и освоения шельфа все чаще используют автономные робототехнические решения. А применение подводных робототехнических машин подстегивает активное развитие гидроакустики [Kumar et al., 2016]. Распространение звуковой волны в шельфовой зоне является сложным процессом из-за большого количества влияющих факторов [Кацнельсон, Петников, 1997], таких как рельеф дна, гидродинамические возмущения и воздействие поглощающего дна. В зависимости от частоты

pronounced near-bottom underwater sound channel. Since such changes affect the propagation of acoustic signals, they are especially important to study when working with autonomous underwater objects, their positioning and communicating with them.

**Keywords:** thermocline; hydrological research; thermal strings; STD-probing; deep sound channel; typhoon; the Peter the Great Bay.

акустического сигнала некоторые факторы доминируют над другими. Например, топография и распределение скорости звука по глубине оказывают значительное влияние на распространение акустического сигнала на высоких частотах.

Целью работы являлось исследовать характерную пространственную изменчивость поля скорости звука на шельфе в заливе Петра Великого в летний период времени и получить некоторые количественные характеристики подводного звукового канала (далее – ПЗК). В гидроакустике исследование подводного звукового канала на шельфе имеет значение как при проведении экспериментальных работ, так и при моделировании распространения звука [Петухов, Бурдуковская, Бородина, 2017]. В ПЗК низкочастотный звук может распространяться до сотен и тысяч километров. Во время одного из экспериментов звук взрыва был зарегистрирован на расстоянии 19 000 км [Brekhovskikh, Lysanov, 2003]. В идеале ПЗК формируется линзой холодной воды, созданной из-за нагрева верхнего слоя океана с низкой скоростью звука в нем. В

<sup>1</sup>Kitamoto A. Digital Typhoon: Typhoon List. URL: [http://agora.ex.nii.ac.jp/cgi-bin/dt/search\\_name2.pl?lang=en&basin=wnp&lt=t&sort=length&stype=number&order=dec](http://agora.ex.nii.ac.jp/cgi-bin/dt/search_name2.pl?lang=en&basin=wnp&lt=t&sort=length&stype=number&order=dec).

Тихом океане звуковой канал формируется на глубинах, где скорость звука равна от 1 450 до 1 485 м/с, а в Атлантическом океане от 1 450 до 1 500 м/с. На шельфе ПЗК может образовываться термоклином, границами распространения звуковой волны являются поверхность и слой с резкими изменениями температуры. Когда скорость звука быстро возрастает, эффект подобен отражению звука от твердой поверхности, например ото дна. В Японском море термоклин четко обозначен в теплый период (июль – сентябрь), когда происходит активный нагрев воды [Navrotsky et al., 2004; Ярошук и др., 2016].

В наших исследованиях поле скорости звука восстанавливалось по измеренному полю температуры с использованием эмпирически подобранных регрессионных зависимостей солености от температуры для данного участка залива [Kosheleva et al., 2021]. Кроме того, изучалось влияние на гидрологическую ситуацию в заливе тайфунов с экстремальной силой ветра 126 км/ч и более в порывах. Следует отметить, что тайфуны, приходящие из тропических регионов Тихого океана, являются обычными событиями для Приморья в летний период. Модельные расчеты показали, что метеорологические условия, когда скорость ветра достигает 54 км/ч и более, являются определяющим фактором в значительных изменениях гидрологии залива [Kosheleva, Lazaryuk, Yaroshchuk, 2015]. Так, например, нами установлено, что под воздействием осеннего северо-восточного ветра со скоростью до 54 км/ч и продолжительностью порядка двух суток развивается мощный апвеллинг на побережье.

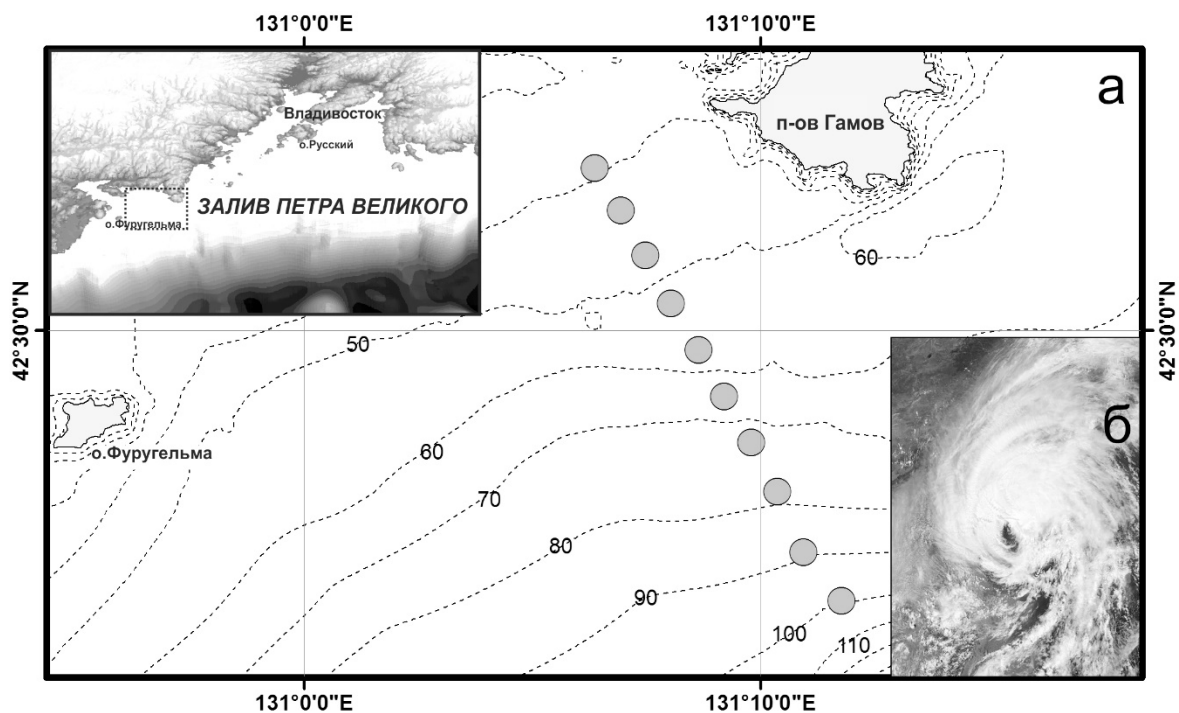
В заливе Петра Великого на гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института регулярно проводятся гидроакустические экспериментальные работы [Долгих и др., 2013; Samchenko et al., 2014; Фершалов и др., 2021], исследования структуры дна [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2014], используются автономные подводные аппараты [Леонтьев и др., 2017]. Начиная с 2008 года на полигоне регулярно проводятся гидрологические исследования

[Ярошук и др., 2016; Kosheleva et al., 2021]. Собранные в ходе исследований данные легли в основу настоящей работы.

### Материалы и методы

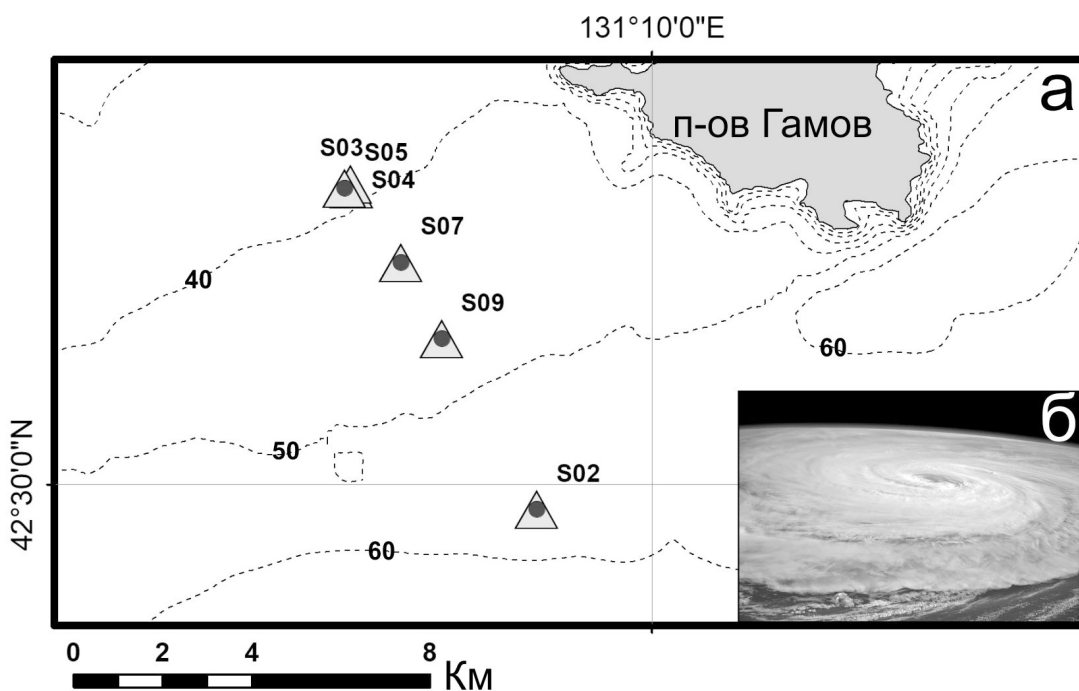
В июле – августе 2012 года нами проводились натурные гидрологические исследования в юго-западной части залива Петра Великого с борта научно-исследовательского судна «Малахит». Схема экспериментальных исследований показана на рисунке 1а. Трасса гидрологических измерений представляет собой линию от 40-м до 100-м изобаты, такой ряд точек обычно называют гидрологическим разрезом. Измерения проводились с помощью профилографа RBR XRX-620 с датчиками Conductivity-Temperature-Depth (далее – CTD-зонд) с частотой дискретизации 6 Гц. В каждой точке разреза зонд опускался, а затем поднимался вертикально ото дна к поверхности. Таким образом, физические свойства воды регистрировались в соответствии с частотой дискретизации зонда по всему водяному столбу. Начало разреза было на глубине 40 м, направление – к свалу глубин (открытая часть залива Петра Великого), глубина в последней, десятой, точке составляла 93 м, а общая длина разреза составила 18,5 км. Таким образом, исследование охватывало мелководную часть шельфа до глубины активного слоя, который по некоторым оценкам достигает 90 м [Navrotsky et al., 2004]. В течение указанного периода времени было проведено 4 гидрологических разреза в этом направлении: 26 июля, 1, 27 и 31 августа 2012 года. Кроме того, разрез 27 августа был сделан как в прямом, так и в обратном направлениях. Все разрезы, за исключением одного, выполнялись во время изменения фазы прилива от высокой до низкой воды. Измерения 1 августа были сделаны в промежутке между низко- и высокоприливной фазами.

На шельфе залива Петра Великого начиная с 2010 года по настоящее время проводятся гидрологические измерения с помощью пространственно-распределенного гидрологического комплекса [Леонтьев и др., 2017].



**Рисунок 1.** Схема гидрологических работ в заливе Петра Великого Японского моря в 2012 году:  
а) общая схема; б) космический снимок тайфуна Болавен<sup>2</sup>.

**Figure 1.** Scheme of hydrological works in the Peter the Great Bay of the Sea of Japan in 2012.  
а) general scheme, б) space image of Typhoon Bolaven.

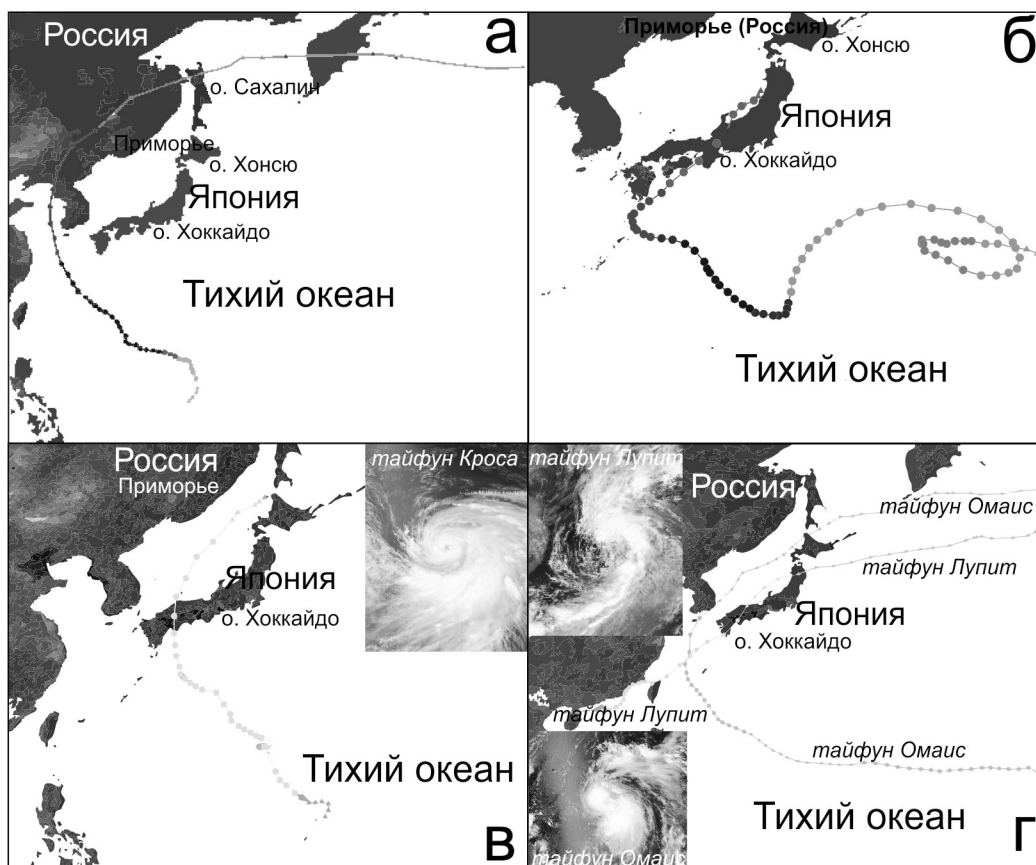


**Рисунок 2.** Схема гидрологических работ в заливе Петра Великого Японского моря в период с 2017 по 2021 год. а) общая схема; б) космический снимок тайфуна Нора<sup>3</sup>.

**Figure 2.** Scheme of hydrological works in the Peter the Great Bay of the Sea of Japan in 2017–2021  
а) general scheme; б) space image of Typhoon Noru.

<sup>2</sup>Typhoon Bolaven (2012). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon\\_Bolaven\\_\(2012\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Bolaven_(2012))

<sup>3</sup>Typhoon Noru (2017). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon\\_Noru\\_\(2017\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Noru_(2017))



**Рисунок 3.** Треки движения тайфунов над Тихим океаном:

- а) тайфун Болавен (Bolaven или Julian) с 19 августа по 1 сентября 2012 года;
- б) тайфун Нору (Noru) с 20 июля по 8 августа 2017 года;
- в) тайфун Кроса (Krosa) 5–16 августа 2019 год и фото из космоса<sup>4</sup>;
- г) тайфун Омаис (Omais или Isang) 10–24 августа 2021 года, тайфун Лупит (Lupit) 2–9 августа 2021 года и фото из космоса<sup>5</sup>.

**Figure 3.** Typhoon tracks over the Pacific Ocean: а) typhoon Bolaven from August 19 to September 1, 2012; б) Typhoon Noru from July 20 to August 8, 2017; в) Typhoon Krosa from August 5–16, 2019 and photo from space; г) Typhoon Omais from August 10–24, 2021, Typhoon Lupit from August 2–9, 2021 and photos from space.

Гидрологический комплекс состоит из вертикальных заякоренные термогирлянд и автономных регистраторов давления, установленных в нижней и верхней части термогирлянды. Время работы комплекса составляло 10–15 дней. На рисунке 2а показаны схема гидрологических исследований, которые проводились в июле – августе 2017 года, в августе 2019 года и августе 2021 года. В местах установки термогирлянд проводились измерения гидрологических характеристик с помощью

CTD-зонда RBR-concerto. Зондирования проводились аналогично выполнению разреза в 2012 году, один или два раза за время работы комплекса. Преимуществом предложенного подхода является получение длительных, до двух недель, непрерывных по времени измерений, в том числе и во время возникновения экстремальных внешних воздействий.

Тайфун Болавен (Bolaven или Julian) прошел вдоль побережья Приморья утром 29 августа 2012 года, что позволило отследить его

<sup>4</sup>Typhoon Krosa (2007). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon\\_Krosa\\_\(2007\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Krosa_(2007))

<sup>5</sup>Tropical Storm Omais (Isang). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/2021\\_Pacific\\_typhoon\\_season#Tropical\\_Storm\\_Omais\\_\(Isang\)](https://en.wikipedia.org/wiki/2021_Pacific_typhoon_season#Tropical_Storm_Omais_(Isang))  
Tropical Storm Lupit (2021). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical\\_Storm\\_Lupit\\_\(2021\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Storm_Lupit_(2021))

влияние на гидрологическую ситуацию на шельфе, где в это время был установлен гидрологический комплекс. Космический снимок тайфуна Болавен показан на рисунке 16. На рисунке 3а показан трек движения тайфуна Болавен, который, зародившись в Тихом океане 19 августа, прошел через Желтое море, затем над территорией Южной и Северной Кореи, Китая и Приморья. Сделав большой крюк по побережью, тайфун прекратил свое существование в Баренцевом море. Максимальная скорость ветра достигала 185 км/ч.

На рисунке 3б показан трек движения тайфуна Нора (Noru). Зародившись в Тихом океане 20 июля 2017 года, тайфун пересек Японские острова и Японское море, краем задев Приморье. Тайфун Нора провзаимодействовал с тайфуном Кулап, 28–30 июля совершил петлю против часовой стрелки к юго-востоку от Японии и превратился в супертайфун 31 июля. Над Японским морем 7–8 августа тайфун стал явлением планетарного масштаба, которое видно на рисунке 2б, а после 10 августа рассеялся.

Тайфун Кроса (Krosa) проходил недалеко от Приморья 16 августа 2019 года (рисунок 3в). Он зародился 5 августа над Марианскими островами и быстро превратился в тропический шторм 3 категории. 13 августа пересек остров Хоккайдо и вышел в Японское море, диаметр шторма увеличился до 1 600 км, а скорость ветра достигала 151 км/ч.

В 2021 году зафиксированные условия влияния штормов на гидрологические характеристики залива Петра Великого значительно отличались от предыдущих в связи с тем, что за довольно короткий период времени прошло три шторма. При этом все они были небольшие и прошли достаточно далеко от Приморья. Тем не менее можно утверждать, что тайфуны повлияли на гидрологические характеристики побережья Приморья. Тайфун Мирина (Mirinae или Gorio) краем прошел около Приморья 6–8 августа 2021 года. Он зародился на восточном побережье Тайваня 3 августа и перемещался вдоль восточного побережья Японии, центр тайфуна не выходил в Японское море. Скорость ветра достигала 95 км/ч. В тоже

время 2 августа 2021 года западнее острова Санья зародился тайфун Лупит (Lupit). Тайфун Лупит прошел вдоль побережья Китая, пересек Восточно-Китайское море, сделав крюк у восточного побережья острова Кюсю, пересек остров Хоккайдо и вышел в Японское море. На побережье Приморья тайфун Лупит краем вышел 8–9 августа. Скорость ветра не превышала 85 км/ч. Тайфун Омаис (Omais или Isang) зародился 6 августа 2021 года над центральной частью Тихого океана, прошел до Южно-Китайского моря и повернул в сторону Японского моря (рисунок 3г). Тайфун Омаис прошел в Японское море через пролив Цусима и 10–11 августа вышел к побережью Приморского края. Скорость ветра достигала 85 км/ч. Уникальность тайфуна Омаис состояла в его продолжительности 14 дней и пройденном пути в 1 610 км.

### Анализ данных наблюдений

Поля скорости звука восстанавливались по температурным данным. Расчет проводился в два этапа. Сначала анализировался набор гидрологических СТД-профилей, полученных в период с 2010 по 2021 год, по ним для различных временных периодов строились диаграммы зависимости солёности от температуры (ST-диаграммы), и для конкретного сезона подбирались модельные зависимости  $S = Y(T)$ . Для августа моделирование выполнялось с помощью регрессионной кривой третьего порядка:

$$S = Y(T) = S_0 + S_1T + S_2T^2 + S_3T^3$$

где  $S$  – солёность;

$T$  – температура;

значения коэффициентов  $S_0, S_1, S_2, S_3$  подбирались эмпирически, а далее оценивались методом наименьших квадратов для каждой серии наблюдений.

Затем по измеренным температурным профилям и модельным солёностям рассчитывались профили скорости звука. Данная методика более подробно описана в работе [Kosheleva et al., 2021]. Расчеты показали, что погрешность определения скорости звука данным методом в случае применения кубической

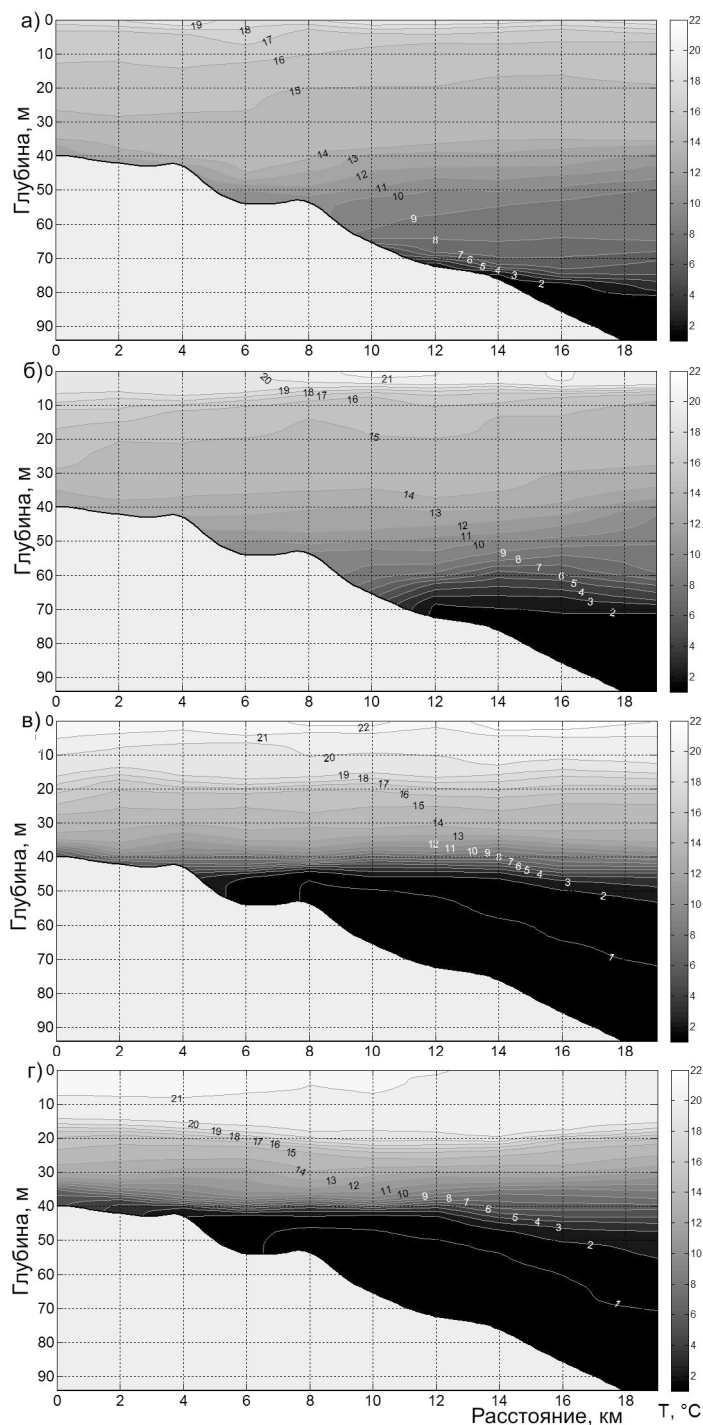
регрессии не превышает  $\pm 0,5$  м/с. Поскольку скорость звука находится в прямой зависимости от температуры, параметры ПЗК можно определить опираясь на температурные данные.

Прежде всего рассмотрим гидрологическую ситуацию в заливе Петра Великого в летний период, когда синоптическая обстановка характеризуется умеренными погодными условиями. Например, в период проведения гидрологических измерений с 25 июля по 2 августа 2012 года метеорологические условия характеризовались достаточной стабильностью: ветер был слабый и лишь временами усиливался до умеренного южных направлений, волнение морской акватории было слабое. Температура воздуха повышалась в течение дня до  $27^{\circ}\text{C}$ , падая ночью до  $20^{\circ}\text{C}$ . Приповерхностный слой воды был прогрет до  $19\text{--}21^{\circ}\text{C}$ , у дна (на глубине 75 м) температура составляла примерно  $1^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4а). Профили скорости звука, полученные в первой и последней точках гидрологического разреза, показаны на рисунке 4. Географическое положение гидрологического разреза показано на рисунке 1. Скорость звука в воде изменялась от 1455 м/с у дна до 1520 м/с у поверхности. Поскольку скорость звука в воде находится в прямой зависимости от температуры, резкие скачки скорости звука находятся в области термоклина, который характеризуется высоким градиентом температуры в толще воды. На рисунке 4а термоклины проявляются областью сгущения изотерм. Наблюдается три термоклина в толще воды до глубины около 70 м, что обусловило три резких скачка скорости звука. Первый расположен вблизи поверхности моря до глубины 8 м. Скорость звука в первом термоклине изменилась на 15 м/с. Второй скачок зафиксирован на глубинах 35–50 м, где скорость звука изменилась на 20 м/с, а последний – на горизонте 60–80 м. Скорость звука изменилась на 35 м/с в третьем термоклине, расположенном у дна. С уменьшением глубины места гидрологическая ситуация изменяется незначительно. За счет рельефа "срезается" нижний слой воды, и остается только прогретая его часть, как хорошо видно на рисунке 4, где

профили скорости звука на первой и последней точках гидрологического разреза практически повторяют друг друга.

На рисунке 5б с 3 по 8 августа 2017 года и рисунке 5в с 7 по 13 августа 2019 года показана гидрологическая ситуация в спокойных метеорологических условиях. На глубинах постановки термогирлянд порядка 40 м выделяется два термоклина. Термоклин, расположенный у поверхности на глубинах до 15 м, характеризуется небольшим градиентом температуры, изменение температуры составило в среднем  $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$  на 5 м глубины (около 15 м/с). Подобная гидрологическая ситуация была описана в работе [Chen-Tung et al., 2003], где гидрологические исследования были проведены в период с 1984 по 1990 год. Таким образом, можно утверждать, что гидрологическая ситуация в регионе достаточно стабильная в пределах определенных сезонов за последние десятилетия.

Тайфун Болавен прошел у побережья Приморья с вечера 28 до утра 29 августа 2012 года, принеся с юго-запада теплую воду. Максимальная скорость ветра составила 126 км/ч. Гидрологический разрез был выполнен 31 августа, когда стих сильный ветер. Во время проведения наблюдений, ветер был умеренный до сильного северо-западного направления. По нашим наблюдениям, прогретый слой воды  $19\text{--}22^{\circ}\text{C}$  достигал глубины 15–20 м (рисунок 4г). Ниже наблюдался слой скачка до 35 м, где температура воды упала с  $19^{\circ}\text{C}$  до  $5^{\circ}\text{C}$ , и далее до дна температура изменялась плавно от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $1^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что с увеличением толщины слоя прогретой более чем на  $15^{\circ}\text{C}$  воды из-за явления перенапряжения в период тайфуна вода холоднее  $5^{\circ}\text{C}$  наблюдалась на глубинах менее 40 м, что не характерно для залива Петра Великого летом. Кроме того, на глубинах 30–35 м был высокоградиентный термоклин с понижением температуры более  $2^{\circ}\text{C}$  на 1 м. В июле и начале августа приповерхностный слой воды прогрет равномерно до  $20^{\circ}\text{C}$ , у дна температура воды опускается до  $1^{\circ}\text{C}$ , и нижний слой скачка находится на глубине порядка 70–80 м (рисунки 4а, 4б). В конце августа наблюдался прогрев верхнего слоя воды до

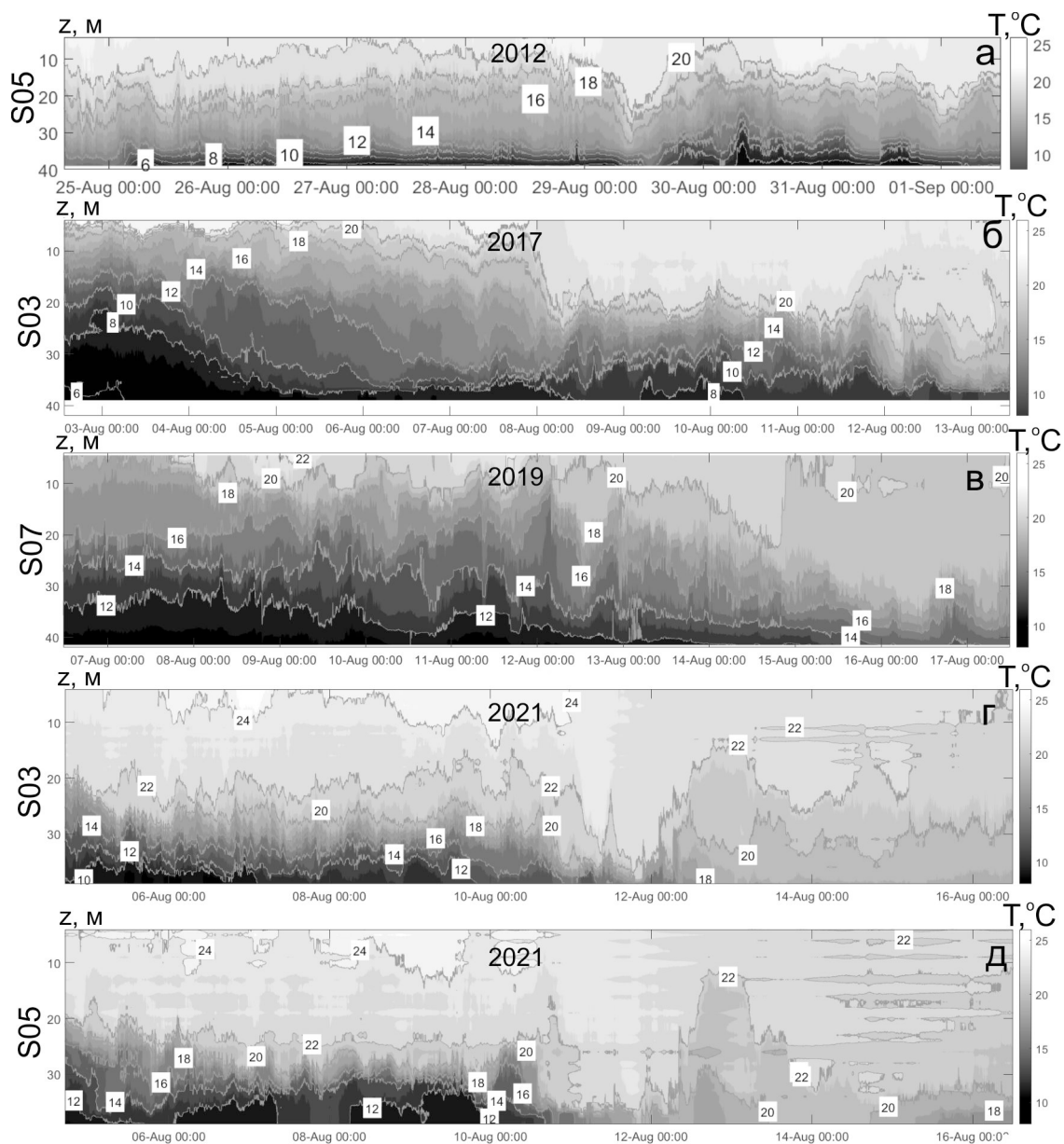


**Рисунок 4.** Распределение температуры по глубине вдоль гидрологического разреза  
 а) 26 июля 2012 года; б) 1 августа 2012 года; в) 27 августа 2012 года; г) 31 августа 2012 года.

**Figure 4.** Temperature distribution in depth along the hydrological section  
 а) July 26, 2012; б) August 1, 2012; в) August 27, 2012; г) August 31, 2012.

температуры более 21°C и вместе с тем увеличивался градиент температуры с глубиной (рисунок 4в), за счет чего нижний слой скачка поднялся до глубин 60–70 м. Скорее всего 25 августа уже сказывалось влияние тайфуна Болавен, который «толкал» вперед себя массы

теплой воды с юго-запада Японского моря. Гидрологическая картина 25 августа по 1 сентября 2012 года имела достаточно спокойный характер (рисунок 5а). Только после прохождения тайфуна с вечера 29 по 30 августа наблюдалось локальное колебание, где вначале



**Рисунок 5.** Профили температуры по глубине полученные с термогирлянд:

а) S05 в августе 2012 года; б) S03 в августе 2017 года; в) S07 в августе 2019 года;

г) S03 в августе 2021 года; д) S05 в августе 2021 года.

**Figure 5.** Depth temperature profiles obtained from thermal strings: а) S05 in August 2012; б) S03 in August 2017; в) S07 in August 2019; г) S03 in August 2021; д) S05 in August 2021.

происходил приток поверхностной теплой воды и мощный термоклин опустился более 40 м, а потом поднимался до 30 м глубины. Далее 31 августа и 1 сентября гидрологическая ситуация стабилизировалась.

Тайфун Нору стал вторым самым продолжительным тропическим циклоном северо-западной части Тихого океана за весь период наблюдений и вторым наиболее интенсивным тропическим циклоном бассейна в

2017 году [Kumar et al., 2016]. В Южном Приморье тайфун Нору прошел краем 7–8 августа 2017 года, ветер достиг 54–72 км/ч с порывами до 90–110 км/ч, временами ветер усиливался до 120–130 км/ч. Высота волн наблюдалась размером в 4–5 м у побережья Приморья. В 2017 году использовались улучшенные автономные вертикальные заякоренные термогирлянды, где на нижнем и верхнем датчиках температуры были

установлены датчики давления [Леонтьев и др., 2017]. С их помощью удалось проследить ретроспективу прохождения тайфуна Нору в заливе Петра Великого.

На рисунке 5б показаны изменения температуры по глубине и времени с 6 по 10 августа 2017 года, зафиксированные термогирляндой S03 (глубина места в точке постановки 40 м). На ней 6 августа наблюдалась спокойная картина – два слабовыраженных широких термоклина, один приповерхностный от 7 до 15 м с падением температуры порядка 7°C и второй на глубинах 27–35 м и изменением температуры на 8°C. В период начала прохождения тайфуна Нору, 7 августа, при возникновении ветровой нагрузки примерно 12–17 м/с, появился приток более теплой воды на поверхности и были зафиксированы проявления пакетов интенсивных внутренних волн. Исследование прохождения интенсивных внутренних волн в заливе Петра Великого более подробно описано в работе [Ярошук и др., 2016]. Глубины расположения термоклин до 8 августа не изменялись, увеличился градиент температуры в верхнем термочлине до 9°C. Значительные изменения гидрологических параметров пришлось на 8 августа, когда были зафиксированы максимальные ветровые нагрузки до 126 км/ч. Прогретый более 20°C слой воды наблюдался до глубины 17–19 м, далее на глубинах 20–30 м прослеживался мощный термоклин с изменением температуры на 15°C. Также фиксировалось прохождение интенсивных внутренних волн. Можно отметить, что сформированный тайфуном Нору мощный термоклин наблюдался до 12 августа и создал придонный ПЗК в заливе Петра Великого на глубинах от 30 м до дна.

При прохождении тайфуна Кроса 19 августа 2019 года распределенные автономные системы были установлены с 7 по 18 августа (рисунок 5в). Схема расположения систем показана на рисунке 2. В период с 7 по 14 августа ярко выраженных термоклин не наблюдалось и амплитуды короткопериодных внутренних гравитационных волн были незначительны. Можно обратить внимание, что приток теплой

поверхностной воды начался еще за два дня до прихода тайфуна на побережье. В это время стал образовываться слой воды на глубине 20–30 м с повышенным градиентом температуры. 16 августа уже полностью сформировался ярко выраженный термоклин на глубине 35–40 м с изменением температуры более чем на 12°C или скорости звука примерно на 42 м/с. Подобная гидрологическая ситуация наблюдалась при прохождении тайфуна Болавен в 2012 году и тайфуна Нора в 2017 году. На фоне внедрения поверхностной теплой воды остается холодный придонный слой и образуется мощный термоклин на глубинах 30–40 м. Влияние тайфунов заметно за несколько дней до их прихода и гидрологическая картина остается стабильной на протяжении нескольких суток после прохождения тайфуна.

В 2021 году была зафиксирована уникальная ситуация, когда на погодные условия на побережье Приморья влияли сразу три тайфуна с временным промежутком в одни сутки. Тайфун Мирина 7–9 августа 2021 года краем прошел по Японскому морю, не приближаясь к Приморью. Тайфун Лупит прошел вдоль побережья Приморья 8–9 августа (рисунок 3д) и тайфун Омаис подошел к побережью Приморья ближе всех 10–11 августа. Влияние тайфунов Мирина и Лупит на гидрологические характеристики было схожее с предыдущими годами, где произошло внедрение теплой поверхностной воды с южной части Японского моря и наблюдался мощный термоклин на глубинах 30–40 м. По всей видимости траектория движения тайфуна Омаис из центра Тихого океана через пролив Цусима и вдоль Корейского полуострова принес рекордно прогретую огромную массу поверхностной воды к южному побережью Приморья. Кроме того, в гидрологической обстановке на побережье Приморья заметно ощущалось влияние двух ранее проходивших тайфунов, наблюдался 30-метровый прогретый слой воды и термоклин был смещен ко дну (9–11 августа на рисунках 5г, 5д). На рисунках 5в, 5г на термогирляндах зафиксирована температура воды более 22°C по всей толще воды до дна с 11 августа по конец наблюдений. На поверхности моря температура

воды, измеренная с помощью STD-зонда во время гидрологических разрезов, достигала 28°C. Подобных высоких значений в данном регионе за более чем 10 лет гидрологических наблюдений зафиксировано не было. Прогретый слой теплой воды более 18°C наблюдался до дна на глубине моря более 60 м. Термоклин опустился ниже глубины зондирования STD-зондом. К сожалению, время постановки и снятия термогирлянд в 2021 году не позволило наблюдать за гидрологической ситуацией на шельфе без влияния тайфунов.

### Выводы

В шельфовой зоне Японского моря в заливе Петра Великого при умеренных метеорологических условиях существует достаточно устойчивая гидрологическая обстановка, характеризующаяся наличием трех термоклинов в активном слое и высокой зависимостью от рельефа дна. Было подтверждено, что активный слой на шельфе составляет приблизительно 90 м. Отмечается, что с увеличением мощности верхнего нагретого слоя градиенты температуры и скорости звука возрастают на глубинах 8–15 и 30–35 м, прижимая слой холодной воды ко дну. Нижний термоклин при стабильных метеорологических условиях наблюдается на глубинах 45–60 м и более, где температура воды порядка 1–3°C. Основная энергия излучаемого звука сосредоточена в придонном ПЗК, ограниченном слоем скачка температуры сверху и морским дном снизу. В данном случае ПЗК формируется в соответствии с типичным для залива профилем скорости звука, но он слабо выражен за счет термоклина с малым градиентом, образующего его верхнюю границу, и сужается при приближении к береговой линии на глубине нижнего термоклина. Слабо выраженные термоклины дают изменения скорости звука на 14–20 м/с в примерно 5-метровом слое воды. Скорость звука в придонном ПЗК составляет около 1 455 м/с.

Гидрологические данные, полученные под влиянием проходящих тайфунов, показывают

значительные изменения в профиле температуры и скорости звука на шельфе залива Петра Великого. Наблюдалось внедрение прогретого верхнего слоя воды за сутки и более до прохождения тайфуна. За счет этого усиливался верхний градиентный слой и он медленно опускался на глубину. Во время прохождения тайфунов три термоклина объединяются в один мощный на глубине примерно 50–60 м. Однако наблюдались различия в расположении термоклина от различных тайфунов. Так, в 2012 и 2017 годах термоклин находился на глубинах 30–40 м, то есть холодная вода менее 4°C поднялась по сравнению с умеренными погодными условиями. Тогда как в 2019 и 2021 годах градиентный слой находился на глубинах 50–60 м, на месте нижнего термоклина во время умеренных погодных условий. Перепад температуры в термоклин, сформированным под действием тайфунов, составил примерно 12–15°C на 10 м глубины. По-видимому, усиления волнения и нагон прогретой поверхностной воды в заливе Петра Великого, вызванные сильными южными и юго-западными ветрами, приводят к появлению ярко выраженного придонного ПЗК. Таким образом, есть возможность поддерживать стабильную подводную связь по ПЗК с автономными объектами на шельфе во время и в течение нескольких дней после прохождения тайфунов. Однако необходимо учесть в технических решениях по передаче акустических сигналов мощный градиентный слой скачка скорости звука, который для высоких частот представляет собой непреодолимый барьер.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (№АААА-А20-120021990003-3): «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

## Литература

- Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 3. С. 321–325. DOI: [10.7868/S0869565213280165](https://doi.org/10.7868/S0869565213280165).
- Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. Москва: Наука, 1997. 193 с.
- Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии океанического дна залива Петра Великого Японского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 538–545. DOI: [10.7868/S0030157414030046](https://doi.org/10.7868/S0030157414030046).
- Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135. DOI: [10.7868/S0032816216060227](https://doi.org/10.7868/S0032816216060227).
- Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Безответных В.В., Петров П.С. Исследование возможности позиционирования автономных подводных аппаратов при выполнении ими глубоководных миссий // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 48–54. DOI: [10.25808/24094609.2019.27.1.006](https://doi.org/10.25808/24094609.2019.27.1.006).
- Петухов Ю.В., Бурдуковская В.Г., Бородина Е.Л. Формирование слаборасходящегося каустического пучка в открытом ко дну подводном звуковом канале // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 59–72. DOI: [10.7868/S0320791916060149](https://doi.org/10.7868/S0320791916060149).
- Фершалов М.Ю., Петров П.С., Манульчев Д.С., Захаренко А.Д. Обобщение метода геоакустической инверсии по записи импульсного сигнала одиночным гидрофоном с учетом неоднородностей батиметрии // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1 (35). С. 51–59. DOI: [10.37102/1992-4429\\_2021\\_35\\_01\\_05](https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_35_01_05).

## References

- Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. New York: Springer-Verlag, 2003. 298 p.
- Chen-Tung A.Ch., Cho-Teng L., Chuang W.S., Yang Y.J, Shiah F-K, Tang T.Y., Chung S.W. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea. *Journal of Marine Systems*, 2003, vol. 42, iss. 1-2, pp. 65–79. DOI: [10.1016/S0924-7963\(03\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(03)00065-4).
- Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Chupin V.A., Shvyryov A.N., Yaroshchuk I.O. The feasibility of laser strainmeters for sea floor diagnostics. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 452, no. 1, pp. 971–975. DOI: [10.1134/S1028334X13090158](https://doi.org/10.1134/S1028334X13090158) (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Chupin V.A., Shvyrev A.N., Yaroshchuk I.O. O perspektivakh primeneniya lazernykh deformografov dlya diagnostiki morskogo dna. *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 452, no. 3, pp. 321–325. DOI: [10.7868/S0869565213280165](https://doi.org/10.7868/S0869565213280165)).
- Emanuel K.A. Increasing destructiveness of tropical cyclone over the past 30 years. *Nature*, 2005, vol. 436, iss. 7051, pp. 686–688. DOI: [10.1038/nature03906](https://doi.org/10.1038/nature03906).
- Fershalov M.Yu., Petrov P.S., Manulchev D.S., Zakharenko A.D. Obobshchenie metoda geoakusticheskoi inversii po zapisi impul'snogo signala odinochnym gidrofonom s uchetom neodnorodnosti batimetrii [Generalization of the method for single-hydrophone geoacoustic inversion: application to a waveguide with inhomogeneous bottom relief]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater investigation and robotics]*, 2021, no. 1 (35), pp. 51–59. DOI: [10.37102/1992-4429\\_2021\\_35\\_01\\_05](https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_35_01_05). (In Russian).
- Katsnelson B.G., Petnikov V.G. *Akustika melkogo morya [Shallow water acoustics]*. Moscow, Nauka, 1997. 191 p.
- Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. The spatiotemporal analysis of the

Ярошук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Степанов Д.В., Швырев А.Н. Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 55–62.

Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. Fundamentals of Ocean Acoustics. New York: Springer-Verlag, 2003. 298 p.

Chen-Tung A.Ch., Cho-Teng L., Chuang W.S., Yang Y.J., Shiah F-K, Tang T.Y., Chung S.W. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea // Journal of Marine Systems. 2003. Vol. 42. Iss. 1-2. Pp. 65–79. DOI: [10.1016/S0924-7963\(03\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(03)00065-4).

Emanuel K.A. Increasing destructiveness of tropical cyclone over the past 30 years // Nature. 2005. Vol. 436. Iss. 7051. Pp. 686–688. DOI: [10.1038/nature03906](https://doi.org/10.1038/nature03906).

Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone // Proceedings of Meetings on Acoustics «5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference» (Vladivostok, Russia, 23–26 September 2015). 2015. Vol. 24. Iss. 1. 005001. DOI: [10.1121/2.0000109](https://doi.org/10.1121/2.0000109).

Kosheleva A.V., Yaroshchuk I.O., Khrapchenkov F.F., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Korotchenko R.A. Upwelling on the narrow shelf of the Sea of Japan in 2011 [Апвеллинг на узком шельфе Японского Моря в 2011 г.] // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2021. Vol. 14. Iss. 1. Pp. 31–42. (In English; abstract in Russian). DOI: [10.7868/S2073667321010032](https://doi.org/10.7868/S2073667321010032).

Kumar M.N.V.S.S., Modalavalasa N., Ganesh L., Prasad K.S., Rao G.S. A new approach for tracking moving objects in underwater environment // Current Science. 2016. Vol. 110. Iss. 7. Pp. 1315–1323. DOI: [10.18520/cs/v110/i7/1315-1323](https://doi.org/10.18520/cs/v110/i7/1315-1323).

Navrotsky V.V., Lozovatsky I.D., Pavlova E.P., Fernando H.J.S. Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea) // Continental Shelf Research.

bottom geomorphology in Peter the Great Bay of the Sea of Japan. *Oceanology*, 2014, vol. 54, iss. 4, pp. 497–504. DOI: [10.1134/S0001437014030047](https://doi.org/10.1134/S0001437014030047). (Russ. ed.: Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Prostranstvenno-vremennoi analiz geomorfologii okeanicheskogo dna zaliva Petra Velikogo Yaponskogo moray. *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 538–545. DOI: [10.7868/S0030157414030046](https://doi.org/10.7868/S0030157414030046)).

Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. *Proceedings of Meetings on Acoustics «5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference» (Vladivostok, Russia, 23-26 September 2015)*, 2015, vol. 24, iss. 1, 005001. DOI: [10.1121/2.0000109](https://doi.org/10.1121/2.0000109).

Kosheleva A.V., Yaroshchuk I.O., Khrapchenkov F.F., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Korotchenko R.A. Upwelling on the narrow shelf of the Sea of Japan in 2011. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2021, vol. 14, iss. 1, pp. 31–42. DOI: [10.7868/S2073667321010032](https://doi.org/10.7868/S2073667321010032).

Kumar M.N.V.S.S., Modalavalasa N., Ganesh L., Prasad K.S., Rao G.S. A new approach for tracking moving objects in underwater environment. *Current Science*, 2016, vol. 110, iss. 7, pp. 1315–1323. DOI: [10.18520/cs/v110/i7/1315-1323](https://doi.org/10.18520/cs/v110/i7/1315-1323).

Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Smirnov S.V. A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, vol. 60, iss. 1, pp. 130–136. DOI: [10.1134/S0020441216060191](https://doi.org/10.1134/S0020441216060191). (Russ. ed.: Leont'ev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N. Prostranstvenno-raspredeleynyi izmeritel'nyi kompleks dlya monitoringa gidrofizicheskikh protsessov na okeanicheskom shel'fe. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2017, no. 1, pp. 128–135. DOI: [10.7868/S0032816216060227](https://doi.org/10.7868/S0032816216060227).)

Morgunov Yu.N., Kamenev S.I., Bezotvetnykh V.V., Petrov P.S. Issledovanie

2004. Vol. 24. Iss. 12. Pp. 1375–1395.  
DOI: [10.1016/j.csr.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.008).

Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoacoustic sediment model // *Chinese Physics Letters*. 2014. Vol. 31. Iss. 12. 124301. DOI: [10.1088/0256-307X/31/12/124301](https://doi.org/10.1088/0256-307X/31/12/124301).

Webster P.J., Holland G.J., Curry J.A., Chang H.-R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment // *Science*. 2005. Vol. 309. Iss. 5742. Pp. 1844–1846. DOI: [10.1126/science.1116448](https://doi.org/10.1126/science.1116448).

vozmozhnosti pozitsionirovaniya avtonomnykh podvodnykh apparatov pri vypolnenii imi glubokovodnykh missii [Investigation of the possibility of positioning autonomous underwater vehicles when they perform deep-sea missions]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater investigation and robotics]*, 2019, iss. 1 (27), pp. 48–54. (In Russian). DOI: [10.25808/24094609.2019.27.1.006](https://doi.org/10.25808/24094609.2019.27.1.006).

Navrotsky V.V., Lozovatsky I.D., Pavlova E.P., Fernando H.J.S. Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea). *Continental Shelf Research*, 2004, vol. 24, iss. 12, pp. 1375–1395. DOI: [10.1016/j.csr.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.008)

Petukhov Y.V., Burdukovskaya V.G., Borodina E.L. Formation of a weakly diverging caustic beam in an underwater sound channel open to the bottom. *Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, iss. 1, pp. 63–75. DOI: [10.1134/S1063771016060142](https://doi.org/10.1134/S1063771016060142). (Russ. ed.: Petukhov Yu.V., Burdukovskaya V.G., Borodina E.L. Formirovanie slaboraskhodyashchegosya kausticheskogo puchka v otkrytom ko dnu podvodnom zvukovom kanale. *Akusticheskii zhurnal*, 2017, vol. 63, iss. 1, pp. 59–72. DOI: [10.7868/S0320791916060149](https://doi.org/10.7868/S0320791916060149)).

Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoacoustic sediment model. *Chinese Physics Letters*, 2014, vol. 31, iss. 12, 124301. DOI: [10.1088/0256-307X/31/12/124301](https://doi.org/10.1088/0256-307X/31/12/124301).

Webster P.J., Holland G.J., Curry J.A., Chang H.-R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 2005, vol. 309, iss. 5742, pp. 1844–1846. DOI: [10.1126/science.1116448](https://doi.org/10.1126/science.1116448).

Yaroshchuk I.O., Leont'ev A.P., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Stepanov D.V., Shvyryov A.N. On intense internal waves in the coastal zone of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, iss. 9, pp. 629–634. DOI: [10.3103/S1068373916090053](https://doi.org/10.3103/S1068373916090053). (Russ. ed.: Yaroshchuk I.O., Leont'ev A.P., Kosheleva A.V.,

Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Stepanov D.V., Shvyrev A.N. Ob intensivnykh vnutrennikh volnakh v pribrezhnoi zone zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, no. 9, pp. 55–62).