

УДК 534.231, 551.468

А.В. КОШЕЛЕВА, А.Ю. ЛАЗАРЮК, И.О. ЯРОЩУК,  
Р.А. КОРОТЧЕНКО, О.Э. ГУЛИН, А.Н. САМЧЕНКО,  
А.А. ПИВОВАРОВ, А.Н. ШВЫРЕВ

## Акустико-океанологическое моделирование гидрофизических параметров морской воды по измерениям температуры в шельфовой зоне Японского моря

*В результате исследований характеристик гидрофизических полей, проводившихся в шельфовой зоне зал. Петра Великого (Японское море) на протяжении ряда лет, рассчитаны устойчивые в течение каждого сезона регрессионные зависимости между распределениями измеренных величин температуры и солёности. При использовании в акустических экспериментах термогирлянд логгеров эти зависимости позволяют значительно повысить точность расчёта пространственно-временных распределений скорости звука и частоты плавучести.*

*Ключевые слова:* поле температуры, поле скорости звука, шельфовая зона, зал. Петра Великого.

**Acoustic-oceanological simulation of seawater hydrophysical parameters on temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone.** A.V. KOSHELEVA, A.Yu. LAZARYUK, I.O. YAROSHCHUK, R.A. KOROTCHENKO, O.E. GULIN, A.N. SAMCHENKO, A.A. PIVOVAROV, A.N. SHVYREV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*The studies of hydrophysical fields characteristics, carried out in the Peter the Great Bay shelf zone (the Sea of Japan) over a number of years, allowed to calculate the regression dependences between the distributions of the measured temperature and salinity values, remaining stable during each season. When the logger thermostrings are used in the acoustic experiments, these dependences allow considerably increasing the accuracy calculation of the sound velocity and buoyancy frequency space-time distributions.*

*Key words:* temperature field, sound velocity field, shelf zone, the Peter the Great Bay.

Для описания и контроля состояния водной среды в ходе акустических экспериментов необходимо знать и учитывать пространственно-временные ( $x, y, z, t$ ) распределения следующих характеристик морской воды: температуры ( $T$ ), солёности ( $S$ ), плотности ( $\rho$ ), градиента плотности – частоты плавучести ( $N$ ) и скорости звука ( $SV$ ) [1]. При этом основной измеряемой величиной является температура, а скорость звука определяется либо при помощи прямых измерителей скорости, либо путем расчёта по измеренным STD-зондами температуре, электропроводности ( $C$ ) и давлению ( $P$ ). Существенный недостаток STD-зондирования состоит в том, что измерения, как правило, выполняются не настолько

\*КОШЕЛЕВА Александра Васильевна – научный сотрудник, ЛАЗАРЮК Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ЯРОЩУК Игорь Олегович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, КОРОТЧЕНКО Роман Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ГУЛИН Олег Эдуардович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, САМЧЕНКО Александр Николаевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ПИВОВАРОВ Александр Анатольевич – научный сотрудник, ШВЫРЕВ Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: kosheleva@poi.dvo.ru

часто и регулярно, как это требуется в акустических экспериментах. Причиной этого могут быть, например, погодные условия, необходимость привлечения дополнительных плавсредств, трудоемкость процедуры измерения и т.п. В практике океанологических исследований кроме STD-зондов принято использовать также локальные регистраторы температуры (одиночные логгеры) либо серии таких регистраторов, закрепленных на кабельтросе (термогирлянды). Термогирлянда устанавливается в выбранной точке акватории, и в течение определенного периода времени происходит регистрация температуры на выбранных горизонтах в соответствии с установленной частотой дискретизации.

На протяжении ряда лет в весенний, летний и осенний сезоны сотрудники лаборатории статистической гидроакустики Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН проводят акустические, океанологические и геофизические исследования на гидрофизическом полигоне, расположенном в юго-западной части зал. Петра Великого [7]. Акустические эксперименты преимущественно выполнялись на двух трассах: от м. Шульца до о-ва Фуругельма и от м. Шульца по направлению на свал глубин (рис. 1). На этих трассах также прокладывались гидрологические разрезы и устанавливались автономные термогирлянды [5]. В 2008–2016 гг. при помощи STD-зондов было выполнено 14 фоновых съемок (однократные гидрологические измерения в каждой точке, охватывающие площадь около 200 км<sup>2</sup>) и более 50 разрезов по направлениям гидроакустических трасс. На отдельных гидрологических станциях дополнительно было получено более 100 временных серий многократных STD-зондирований с шагом 30 мин в течение суток либо каждые 2 мин в течение 1,5 ч. В экспериментах с августа 2010 г. использовались автономные термогирлянды, состоящие из 12–39 логгеров, которые фиксировали измененные значения с частотой 1 Гц. Термогирлянды устанавливались на срок до 11 суток.

Перечисленный комплекс экспериментальных работ по исследованию гидрофизических полей позволил собрать статистику их изменчивости на различных пространственных и временных масштабах [6, 8].

Необходимо отметить, что использование только данных термогирлянд не позволяет достичь требуемой точности решения серии задач акустических экспериментов. Поэтому

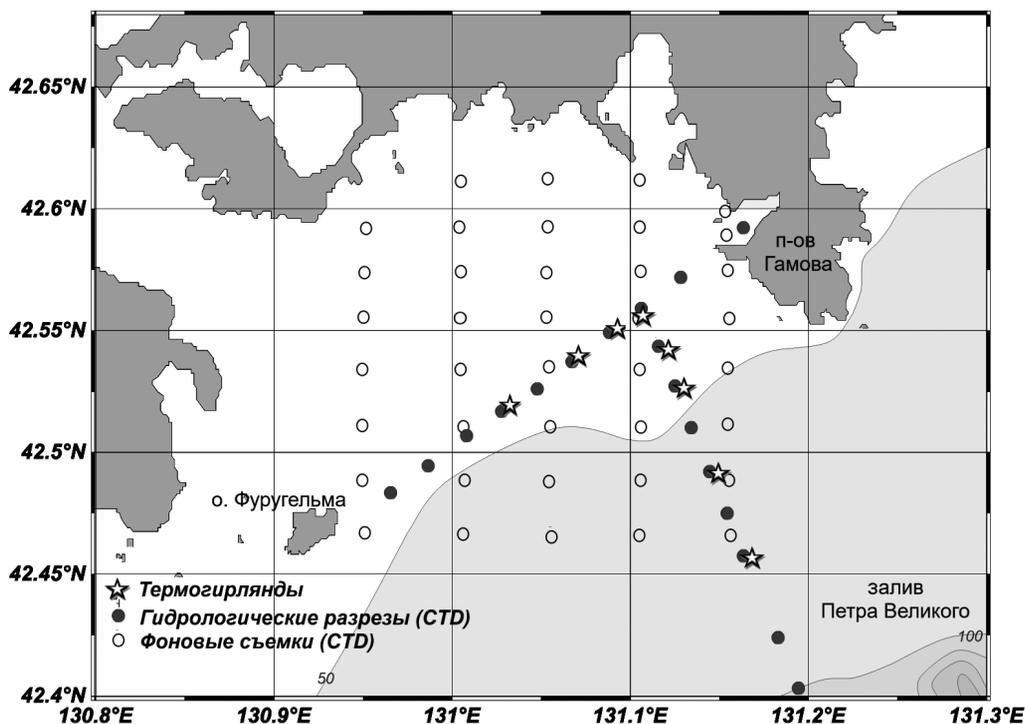


Рис. 1. Район исследования в зал. Петра Великого (Японское море)

пространственно-временную изменчивость полей скорости звука и частоты плавучести определяли, используя объединенные данные: полученные при STD-зондированиях и зафиксированные логгерами термогирлянд. Предлагаемая методика формирования массивов скорости звука  $SV(x, y, z, t)$  и частоты плавучести  $N(x, y, z, t)$ , используемых для решения поставленных задач, включала: определение модельной зависимости распределения солености от температуры  $S_s(T)$ , установленной из анализа STD-данных  $\{T_m(z); S_m(z)\}$  [9]; расчет рядов  $SV(x, y, z, t)$  и  $N(x, y, z, t)$  по массиву температур  $T_m(x, y, z, t)$ , измеренному логгерами, и модельной регрессии солености  $S_s(T)$ . Схематично этот процесс представлен на рис. 2. Индекс « $m$ » (от англ. «measured») указывает на то, что величина была измерена, « $s$ » (от англ. «simulated») – что она была смоделирована при помощи выявленных регрессионных зависимостей. Верификация разработанной методики выполнена путем сравнения профилей  $SV_m(z) = f(T_m, S_m, P)$ ,  $N_m(z) = f(T_m, S_m, P)$ , рассчитанных по многолетним рядам данных STD-измерений, и  $SV_s(z) = f(T_m, S_s, P)$ ,  $N_s(z) = f(T_m, S_s, P)$ , при формировании которых использовались модельные регрессии  $S_s(T)$ .

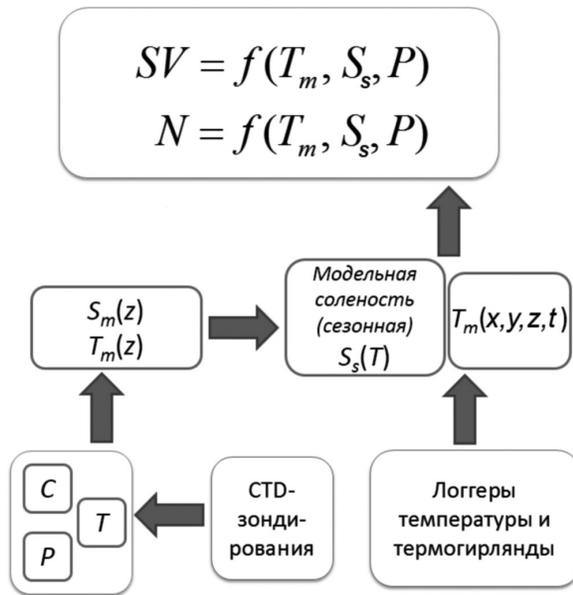


Рис. 2. Схема определения параметров водной среды на основе экспериментальных данных

Анализ данных натуральных экспериментов и их применение в последующих расчетах невозможны без оценки и учета уровней погрешностей, а также без первичной обработки данных, которая позволяет понизить вклад этих погрешностей [10]. Погрешности измеренных характеристик принято разделять на методические, систематические, случайные и динамические. Методические погрешности зависят от условий проведения измерений, например, от качки судна, с борта которого выполняются измерения. Систематические, как правило, остаются постоянными в течение периода наблюдения и обусловлены точностью определения градуировочных коэффициентов при калибровке. Случайные погрешности связаны с разрядностью квантования измеряемых параметров и помехами, а динамические – с метрологическими характеристиками сенсоров приборов и стратификацией слоя морской воды [3]. Следует отметить, что заявленные производителями метрологические характеристики измерительных приборов получены на основании лабораторных испытаний. В реальности же ошибки, особенно связанные с инерционным эффектом, существенно возрастают [10]. При детальном анализе вклада различных видов погрешностей выявлено, что динамическая погрешность используемых приборов на два порядка превышает

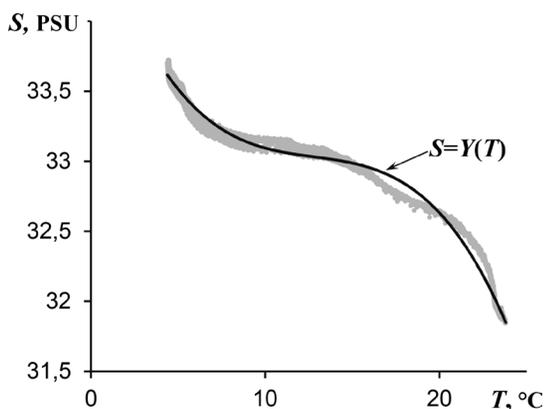


Рис. 3. Регрессионная кривая третьего порядка (черная линия), рассчитанная по данным CTD-зондирований (серая линия), выполненных в течение 1,5 ч на начальной станции акустических трасс 25 августа 2010 г. (глубина 40 м)

электропроводности. После обработки данных оценки суммарных погрешностей, включающие систематические, случайные и динамические компоненты, при наличии стратификации  $dT/dt = 1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  составили  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$  для температуры,  $0,02 \text{ PSU}$  для солёности,  $2 \cdot 10^{-5} \text{ г}/\text{см}^3$  для плотности и  $0,05 \text{ м}/\text{с}$  для скорости звука.

Оценка погрешности данных термогирианд не превышала  $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$  [9].

Состояние водных масс в пределах исследуемых районов принято оценивать по изменчивости их  $TS$ -диаграмм, установленных по данным гидрологических съёмок [2]. Анализ CTD-данных, полученных с мая по октябрь 2008–2016 гг., показал, что  $TS$ -диаграммы водной массы, расположенной в шельфовой зоне зал. Петра Великого (сектор с глубинами дна от 30 до 100 м), характеризуются относительной однородностью на пространственных масштабах до 30–40 км и стабильностью на временных интервалах 7–10 сут [5, 6]. Этот вывод позволяет определять функциональную зависимость  $S = Y(T)$  по результатам CTD-зондирований на двух–трех станциях, расположенных на трассе акустического эксперимента, протяженность которой не превышает 20 км.

Зависимости  $S = Y(T)$  в основном определялись с помощью кривой третьего порядка:

$$Y(T) = S_0 + S_1 \cdot T + S_2 \cdot T^2 + S_3 \cdot T^3,$$

а значения коэффициентов  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  оценивались методом наименьших квадратов для каждой серии наблюдений. Например, данные, полученные 25 августа 2010 г. на начальной станции акустических трасс в месте глубиной 40 м (рис. 3), соответствовали регрессионной кривой  $Y(T)$  с коэффициентами  $S_0 = 34,811$ ,  $S_1 = -0,3842$ ,  $S_2 = 0,0287$ ,  $S_3 = -0,0007$ . На этапе анализа этих данных рассматривались 3 варианта моделирования солёности:  $S = \text{const}$ , линейная и кубическая зависимости. Расхождения между значениями скорости звука, рассчитанными по CTD-данным и полученными с использованием модельной зависимости  $S(T)$ , достигали  $2 \text{ м}/\text{с}$  для варианта с однородной стратификацией солёности. При линейном распределении  $S(T)$  разброс варьировал в пределах  $\pm 0,7 \text{ м}/\text{с}$ , а в случае применения кубической регрессии не превышал  $\pm 0,5 \text{ м}/\text{с}$ . Удвоенные среднеквадратичные отклонения для каждой из перечисленных разностей составили 1,3, 0,4 и 0,1 м/с соответственно.

Влияние выбора стратификации солёности  $S(T)$  на расчет частоты плавучести – параметра, характеризующего устойчивость водной среды к воздействиям, демонстрирует рис. 4. Как видно из рисунка, вклад градиента солёности при определении частоты плавучести становится заметным в слоях выше и ниже термоклина, который в данном случае располагался на глубинах от 10 до 25 м. Внутри термоклина влияние стратификации солёности минимально.

сумму систематической и случайной погрешностей (например, для измененного градиента  $dT/dt = 1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  динамическая погрешность определения температуры по показаниям зонда RBR XR-620 составляет  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  против суммарной  $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [9].

Процесс первичной обработки данных позволяет существенно понизить уровень динамической погрешности. Коррекция данных CTD-зондирований выполнялась с помощью прямого и обратного экспоненциальных фильтров [3]. Разработанная в ТОИ ДВО РАН программа CTD-data\_Processing [4] использует оценочные (установленные эмпирически) значения коэффициента инерционности для температуры и

На рис. 5 представлены результаты определения оптимальных степеней полинома  $Y(T)$  для различных серий наблюдений. В течение весеннего (рис. 5а) и осеннего (рис. 5б) сезонов для достижения точности 0,1 м/с при расчете скорости звука достаточны линейные зависимости, а данные, полученные в летних экспериментах (рис. 5б), требуют использовать кубическую регрессию. Это обусловлено прежде всего увеличением толщины слоя термоклина. К тому же во второй половине лета из-за муссонных дождей верхние слои водной массы залива подвержены распреснению. Данные, полученные в этот период на шельфе зал. Петра Великого, демонстрируют увеличение пространственных градиентов солености. В результате существенно возрастают уровни дисперсии разности величин скорости звука, полученных по СТД-данным и с использованием модельной солености  $Y(T)$  [9].

На шельфе зал. Петра Великого флуктуации поля скорости звука, вызванные фоновыми внутренними волнами, обычно не превышают 1 м/с, в то же время предлагаемая методика определения регрессии  $S(T)$  позволяет рассчитывать распределения  $SV(x, y, z, t)$ , включая фоновые флуктуации, с достаточной точностью – менее 0,1–0,25 м/с.

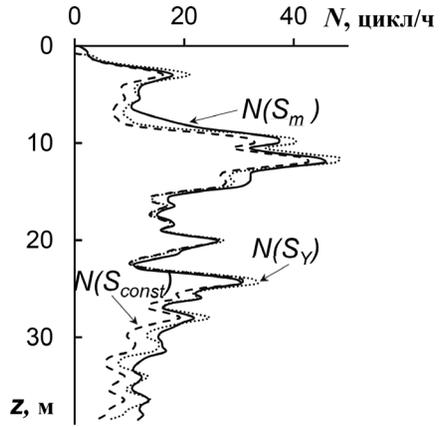


Рис. 4. Частота плавучести, рассчитанная по данным зондирования 25 августа 2010 г. (сплошная линия) и с учетом модельных вариантов регрессии солености: полином третьей степени (пунктирная линия) и однородная стратификация (штриховая линия)

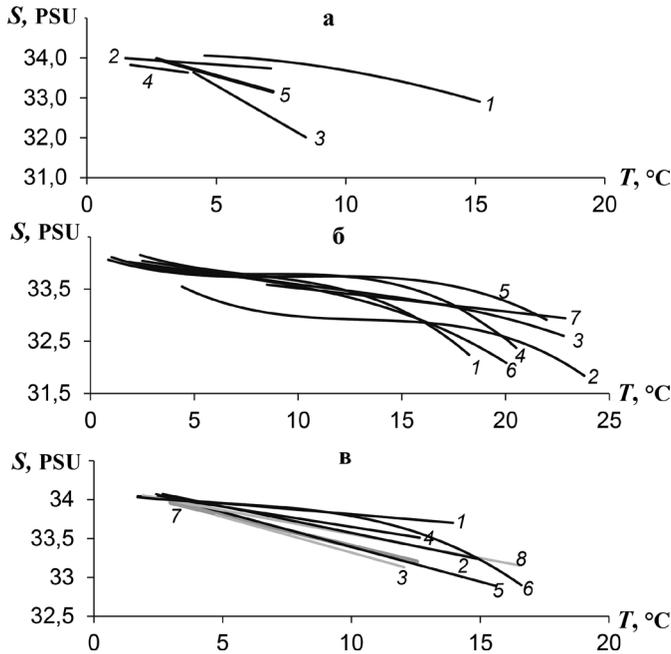


Рис. 5. Оптимальные полиномы, установленные для серий наблюдений: а – весеннего периода (1 – 10 июня 2008 г., 2 – 15 мая 2009 г., 3 – 29 мая 2010 г., 4 – 12 мая 2011 г., 5 – 19 мая 2015 г.); б – летнего (1 – 31 августа 2009 г., 2 – 27 августа 2010 г., 3 – 28 августа 2011 г., 4 – 1 августа 2012 г., 5 – 27 августа 2012 г., 6 – 20 августа 2013 г., 7 – 21 августа 2014 г.); в – осеннего (1 – 12 октября 2008 г., 2 – 13 октября 2009 г., 3 – 20 октября 2010 г., 4 – 12 октября 2011 г., 5 – 19 октября 2012 г., 6 – 8 октября 2013 г., 7 – 18 октября 2013 г., 8 – 8 октября 2014 г.)

Таким образом, в ходе проведенного исследования:

- 1) оценены погрешности данных STD-измерений, предложен метод их уменьшения до приемлемого уровня (менее 0,1 м/с при расчете значений скорости звука);
- 2) определены оптимальные полиномиальные регрессии  $S(T)$  для различных серий наблюдений в соответствии с сезонами и найдены временные рамки их применимости.

Разработанный метод показал высокую эффективность при решении серии задач акустических экспериментов, проводившихся на протяжении ряда лет в различные сезоны года.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доценко С.В. Теоретические основы измерения физических полей океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 288 с.
2. Коротченко К.А. Регрессионный метод оценки солености в океане // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 501–512.
3. Лазарюк А.Ю. Динамическая коррекция STD-данных // *Подводные исследования и робототехника*. 2009. № 2 (8). С. 59–71.
4. Лазарюк А.Ю., Кошелева А.В. Свидетельство № 2014619779 о гос. регистрации программы для ЭВМ «Коррекция данных глубоководных гидрологических наблюдений STD-зондов (STD-data\_Processing)» // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: офиц. бюл. Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). 2014. № 10 (96).
5. 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.
6. Самченко А.Н., Кошелева А.В. Особенности поля скорости звука в прибрежной зоне Японского моря (залив Петра Великого) // *Вестн. ДВО РАН*. 2012. № 6. С. 108–113.
7. Самченко А.Н., Коротченко Р.А., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. Экспериментальные низкочастотные гидроакустические исследования в прибрежной зоне Японского моря (залив Петра Великого) // *Вестн. ДВО РАН*. 2016. № 5. С. 31–35.
8. 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.
9. 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*. 2015. Vol. 24, 005001. – doi: 10.1121/2.0000109.
10. The acquisition, calibration, and analysis of CTD data. Paris: UNESCO, 1988. 94 p. (UNESCO Technical Papers in Marine Science; vol. 54).