

Модуль оценивания солености морской воды на основе измерений скорости звука

А. П. Толстошеев , Е. Г. Лунев, С. В. Мотыжев, В. З. Дыкман

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 tolstosheev@marlin-yug.com

Поступила в редакцию 05.06.2020 г.

Цель. Достоверность знаний о динамике океана и изменчивости климата в значительной степени ограничивается отсутствием систематических контактных наблюдений солености в поверхностном слое моря – одного из основных гидрологических параметров, определяющих циркуляцию и стратификацию водных масс. Цель данной работы – создание автономного средства долговременного мониторинга солености верхнего слоя морской воды.

Методы и результаты. Одним из наиболее эффективных средств контактных наблюдений верхнего слоя океана является глобальная сеть поверхностных дрейфующих буйев – дрейфтеров. В настоящее время в состав сети, насчитывающей свыше 1,5 тыс. буйев, входит лишь небольшое количество дрейфтеров-солемеров, применение которых, как правило, ограничено рамками пилотных экспериментов. Вычисление солености в дрейфтерах реализовано традиционным методом с использованием результатов измерений электропроводимости и температуры. Существует ряд проблем, связанных как с принципом определения солености таким методом, так и с обеспечением долговременной стабильности датчиков электропроводимости в условиях загрязнения и биологического обрастания. В Морском гидрофизическом институте РАН был разработан дрейфтер с модулем SVT для вычисления солености альтернативным методом – по результатам измерений скорости звука и температуры. В модуле используются специально разработанный времяпролетный измеритель скорости звука с фиксированной базой и кварцевый датчик температуры. В течение двух лет были выполнены многочисленные лабораторные и натурные испытания нескольких экземпляров модуля SVT. По данным лабораторных испытаний, пределы сходимости результатов измерений скорости звука в дистиллированной воде составили $\pm 0,02$ м/с. По данным долговременных натуральных испытаний, которые проводились в условиях интенсивного биологического обрастания, погрешность оценивания солености по результатам измерений скорости звука и температуры модулем SVT находилась в пределах $\pm 0,05$ ‰, что позволяет рассчитывать на устойчивость характеристик модуля в реальных условиях длительной необслуживаемой эксплуатации в составе дрейфтера.

Выводы. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование дрейфтеров с модулями измерения скорости звука и температуры в качестве эффективного средства систематического оперативного мониторинга поля солености верхнего слоя моря.

Ключевые слова: дрейфующий буй, морская вода, скорость звука, температура, соленость

Благодарности: авторы выражают свою признательность рецензентам за ценные замечания и методическую помощь. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Развитие методов и средств оперативной океанологии для исследований изменчивости полей Черного моря» (шифр «Черное море») Программы фундаментальных научных исследований президиума РАН № 20 «Новые вызовы климатической системы Земли» на 2019 г. при финансовой и технической поддержке ООО «Марлин-Юг».

Для цитирования: Модуль оценивания солености морской воды на основе измерений скорости звука / А. П. Толстошеев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 132–142. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-132-142

Seawater Salinity Estimating Module Based on the Sound Velocity Measurements

A. P. Tolstosheev ✉, E. G. Lunev, S. V. Motyzhev, V. Z. Dykman

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ tolstosheev@marlin-yug.com

Purpose. Reliability of knowledge about the ocean dynamics and climate variability is largely limited for lack of systematic *in situ* observations of the sea surface layer salinity, which is one of the basic hydrological parameters determining circulation and stratification of the water masses. The study is aimed at developing an autonomous device for long-term monitoring of salinity in the seawater upper layer.

Methods and Results. One of the most effective tools for *in situ* observations of the ocean upper layer is the global network of surface drifting buoys – drifters. At present, the network consists of more than 1500 buoys, but only a few of them provide sea surface salinity observations within the framework of a limited number of pilot experiments. In the drifters, salinity is calculated by the traditional method using the results of the electrical conductivity and temperature measurements. There are a few problems related both to the principle of determining salinity by this method and to providing long-term stable running of conductivity sensors under the conditions of pollution and biological fouling. A drifter equipped with the module for the sound velocity and temperature measurements used for calculating salinity by an alternative method just aboard the drifter, was developed in Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences. The sound velocity and temperature module includes a specially designed time-of-flight sound velocity sensor with the fixed base and a quartz temperature sensor. In course of two years, numerous laboratory and *in situ* tests of several prototypes of the sound velocity and temperature module were performed. The laboratory tests showed that the repeatability limits for the results of the sound velocity measurements in the distilled water were ± 0.02 m/s. According to the data of the long-term *in situ* tests performed at intensive biological fouling, the error of salinity estimation resulted from of the sound velocity and temperature measurements were within ± 0.05 ‰. This result permits to expect that the sound velocity and temperature module parameters will remain stable in real conditions of long-term autonomous operation.

Conclusions. The obtained results make it possible to recommend application of the drifters equipped with the modules for the sound velocity and temperature measurements as an effective tool for regular operational monitoring of the salinity field of the upper sea layer.

Key words: drifting buoy, seawater, sound velocity, temperature, salinity

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers for their valuable comments and methodological assistance. The study was carried out within the framework of the state task on theme "Development of methods and means of operational oceanology for studying the variability of the Black Sea fields" (code "Black Sea") of the Program of fundamental scientific research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 20 "New challenges of the Earth's climate system" for 2019 at the financial and technical support of "Marlin-Yug" Ltd.

For citation: Tolstosheev, A.P., Lunev, E.G., Motyzhev, S.V. and Dykman, V.Z., 2021. Seawater Salinity Estimating Module Based on the Sound Velocity Measurements. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(1), pp. 122-131. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-122-131

Введение. В последние два десятилетия основным источником систематической оперативной контактной информации о состоянии верхнего слоя океана и приземной атмосферы стали автономные дрейфующие платформы сбора данных – поверхностные дрейфтеры [1, 2]. Данные мониторинга доставляются пользователям по каналам спутниковых систем связи *Argos* или *Iridium*. В настоящее время одна из наиболее актуальных задач совершенствования дрейфтерной наблюдательной сети состоит в создании дрейфтера с функцией вычисления солёности. Сложность решения этой задачи заключается в специфике дрейфтерных наблюдений. Для того чтобы мониторинг был

экономически целесообразен, дрейфтеры при относительно невысокой стоимости должны обеспечивать работоспособность в течение минимум 1 года, сохраняя метрологические характеристики измерительных каналов в условиях загрязнения, биологического обрастания и других воздействующих факторов.

В статьях (см., например, [3–6] и др.) приведены результаты мониторинга солености несколькими десятками дрейфтеров, которые были развернуты в Атлантическом океане в 2007–2014 гг. Авторы указанных статей приводят оценки качества данных лишь для небольшого количества дрейфтеров, время жизни которых позволило получить статистически значимые объемы информации. В большинстве случаев данные дрейфтеров сопоставлялись с данными дистанционного зондирования или буев-профилемеров *Argo*, располагавшихся на значительном удалении от дрейфтеров, реже – с данными зондирования судовыми средствами. Отклонения результатов вычисления солености в сопоставлении с данными буев-профилемеров *Argo* в среднем оцениваются в пределах $\pm 0,2\%$, в сопоставлении с данными зондирования судовыми средствами – $\pm 0,1\%$. В теплое время года пределы отклонений увеличиваются до $\pm 0,5\%$. В зависимости от условий дрейфа отклонения начинают проявляться в сроки от нескольких недель до нескольких месяцев. Значительное количество дрейфтерных данных, по оценкам авторов, содержат сбой и требуют предварительной фильтрации, что исключает их оперативное усвоение.

Соленость во всех дрейфтерах рассчитывается традиционным методом по данным прямых измерений электропроводимости и температуры, которые выполняются с помощью модуля *SBE 37* (*Sea-Bird Electronics*, США). Характеристики модуля позволяют вычислять соленость с погрешностью не более $0,003\%$. Однако, как следует из приведенных выше оценок, реальная погрешность определения солености оказывается в десятки раз больше. Одна из основных причин этого – загрязнение и биологическое обрастание измерительной ячейки датчика электропроводимости. С учетом специфики эксплуатации автономного дрейфтера применение существующих способов защиты от влияния этих факторов оказывается либо малоэффективным, либо экономически и (или) энергетически слишком затратным. Результаты анализа опыта применения дрейфтеров-солемеров с модулями измерения электропроводимости и температуры объясняют тот факт, что при очевидной актуальности задачи установления систематического контактного мониторинга полей солености верхнего слоя океана эксперименты с дрейфтерами-солемерами до сих пор остаются в стадии пилотных. Так, по состоянию на май 2020 г. из 1581 дрейфтера, развернутых в Мировом океане, функционируют только два дрейфтера-солемера¹, при том что, по оценкам [7], мониторинг солености верхнего слоя океана необходимо выполнять с разрешением по горизонтальным координатам не хуже 250×250 км. Наряду с этим существуют альтернативные методы вычисления солености морской воды (по скорости звука, коэффициенту преломления), реализация которых по ряду причин не нашла широкого применения на практике. В статье рассматриваются результаты разработки модуля вычисления солености по данным прямых измерений скорости звука и температуры.

¹ URL: https://www.aoml.noaa.gov/phod/graphics/dacdata/may20_globpop.gif (дата обращения: 25.05.2020).

Модуль измерения скорости звука и температуры. Скорость звука является прямо измеряемой физической величиной, но чаще всего она вычисляется как производная характеристика из уравнения состояния морской воды. До недавнего времени рабочие средства измерения скорости звука обеспечивали погрешности в несколько десятков сантиметров в секунду. Такие погрешности позволяют эффективно решать задачи прикладной гидроакустики, но совершенно неприемлемы для получения достоверных оценок вторичных гидрологических параметров.

Из-за низкой точности методов и средств измерений скорости звука не нашли практического применения предложенные рядом авторов соотношения для расчетов солёности, плотности, частоты Вьяйсяля – Брента на основе данных о скорости звука. Эти параметры традиционно вычисляются по результатам измерений электропроводимости, температуры и давления. При этом в рамках гипотезы постоянства относительного химического состава морской воды используется бинарная модель «дистиллированная вода + квазиоднородная соль». Скорость звука в отличие от электропроводимости характеризует концентрацию всех растворенных в воде веществ, и, следовательно, использование ее для вычисления вторичных гидрологических параметров позволило бы преодолеть указанное ограничение. Однако ни появление на рынке высокоточных измерителей скорости звука (например, датчики *UV-SVP* производства *Valeport*, США), ни совершенствование уравнений расчетов вторичных параметров по данным скорости звука [8] не привели к изменению сложившейся практики наблюдений. Из публикаций очевиден дефицит информации о методиках и результатах натурных экспериментов, направленных на оценивание альтернативных методов мониторинга вторичных гидрологических параметров. В рамках решения задачи установления систематического мониторинга полей солёности верхнего слоя моря, в Морском гидрофизическом институте РАН был разработан модуль вычисления солёности по результатам измерения скорости звука и температуры – модуль *SVT*, конструкция и характеристики которого ориентированы на эксплуатацию в составе дрейфера (рис. 1).



Р и с. 1. Внешний вид дрейфера с модулем *SVT*
F i g. 1. Appearance of the drifter with the sound velocity and temperature module

Измеритель скорости звука (ИСЗ) модуля *SVT* реализован по времяпролетному методу (см., например, [9] и др.), в соответствии с которым скорость звука рассчитывается по времени распространения ультразвукового импульса на фиксированной измерительной базе. Несмотря на простоту метода, для корректной реализации его на практике необходимо преодолевать значительные трудности, связанные с минимизацией инструментальной и методической погрешностей.

Инструментальная погрешность измерения скорости звука определяется нестабильностью длины измерительной базы, погрешностью временной привязки принятых эхо-сигналов, погрешностью измерения интервала времени, дифракционной погрешностью; методическая погрешность – погрешностью метода калибровки.

В ИСЗ используется двухбазовый акустический датчик [10], состоящий из акустического приемопередающего преобразователя и измерительной базы. Такая конструкция датчика позволяет обеспечить его защиту от биологического обрастания простыми пассивными методами.

Измерительная база датчика длиной ~ 70 мм выполнена из ситалла СО-115М с температурным коэффициентом линейного расширения $\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$ 1/град. Благодаря этому в рабочем диапазоне температур относительное изменение длины базы не превышает $3 \cdot 10^{-6}$, что соответствует внесению дополнительной погрешности $\sim 0,005$ м/с.

В датчике при возбуждении импульсом акустического преобразователя в среду излучается акустический сигнал и, распространяясь, достигает первого и второго отражателей. Отраженные эхо-сигналы принимаются акустическим преобразователем и преобразуются в электрические сигналы, привязка которых ко времени приема эхо-сигналов осуществляется в моменты пересечения нуля их одноименных полупериодов. При таком способе формируется интервал времени, длительность которого не зависит от флуктуаций амплитуд акустических эхо-сигналов и дополнительных задержек [11], а определяется только скоростью звука в среде.

Оценивая погрешности измерения интервала времени, необходимо отметить следующее. Успехи в создании современных высокоточных средств измерения скорости звука непосредственно связаны с появлением на рынке новых недорогих время-цифровых преобразователей и высокостабильных генераторов. В преобразователях для квантования временных интервалов используются задержки распространения сигнала в логических элементах, что при длительности интервалов в сотни микросекунд позволяет получить разрешающую способность в несколько десятков пикосекунд. Проблемы, связанные с нестабильностью задержек, обусловленных влиянием воздействующих факторов, решаются калибровочными процедурами с помощью высокостабильного опорного генератора.

В ИСЗ время распространения эхо-сигналов измеряется с помощью время-цифрового преобразователя типа *TDC7200* (*Texas Instruments*, США) и термокомпенсированного генератора *FOX924* (*FOX Electronics*, США). Разрешающая способность преобразователя $55 \cdot 10^{-12}$ с, долговременная нестабильность частоты генератора в диапазоне изменчивости влияющих факторов – не более $3 \cdot 10^{-6}$. При длине измерительной базы ~ 70 мм такие характеристики соответствуют погрешности измерения скорости звука не более 0,005 м/с с разрешением не хуже 0,001 м/с.

Дифракционная составляющая погрешности обусловлена отличием реальной звуковой волны от плоской из-за конечных размеров акустического преобразователя и отражателей измерительной базы датчика ИСЗ. Количественные оценки влияния дифракции достаточно сложны и основаны на многочисленных предположениях и допущениях [12]. В рассматриваемом ИСЗ эта состав-

ляющая погрешности устраняется при калибровке в рабочем диапазоне скоростей звука.

В качестве измерителя температуры в модуле *SVT* использовался кварцевый преобразователь температуры ПТК-3М², характеристики которого рассматриваются в следующем разделе.

Следует заметить, что авторы ряда публикаций, посвященных разработке высокоточных ИСЗ, приводят оценки погрешности, часто сопоставимые с погрешностью Государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах³. При этом не уточняются методы калибровки и отсутствуют сведения о долговременной стабильности характеристик, что создает неопределенность при оценивании возможностей практического применения ИСЗ. Учитывая также то, что в настоящее время для высокоточных ИСЗ не существует единой поверочной схемы, количественные оценки характеристик разработанного ИСЗ предваряются краткими описаниями процедур их получения. По этой же причине термин «погрешность» далее применяется только относительно инструментальных составляющих погрешности ИСЗ. В качестве характеристики точности измерений скорости звука мы будем пользоваться термином «сходимость»⁴.

Методика и результаты исследований характеристик модуля *SVT*.

Характеристики измерительных каналов модуля вычисления солёности исследовались в лабораторных и натуральных условиях. Исследования были направлены на оценивание случайной составляющей погрешности и сходимости результатов измерения скорости звука в дистиллированной воде, погрешности измерения температуры, сходимости результатов вычислений солёности морской воды по данным скорости звука и температуры. Одно из основных направлений исследований заключалось в выяснении долговременной стабильности характеристик измерительных каналов.

Характеристика преобразования ИСЗ оценивалась с помощью метода, при котором значения скорости звука воспроизводятся путем изменения температуры дистиллированной воды. При этом в качестве образцовых принимаются значения скорости звука, рассчитанные по формуле Дель Гроссо [13] для дистиллированной воды. Поскольку, как уже указывалось, существуют проблемы метрологического обеспечения измерений скорости звука, следует сделать некоторые уточнения, касающиеся методики определения характеристик ИСЗ.

В модуле *SVT* синхронно с измерением времени распространения акустического сигнала на измерительной базе τ_{SV} измеряется температура среды T_{SV} . Это дает возможность по результатам калибровки в рабочем диапазоне температур и скоростей звука учесть суммарный вклад дополнительных составляющих погрешности (нестабильность длины измерительной базы, частоты опорного генератора, дифракционная погрешность и др.) без выяснения степени влияния каждой из них. Практически процедура калибровки состояла в следующем:

² URL: <https://sktbelpa.ru/preobrazovatel-temperatury-kvartsevyy-ptk-3m.html> (дата обращения: 25.05.2020).

³ URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200110968> (дата обращения: 25.05.2020).

⁴ URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения: 25.05.2020).

– в дистиллированной воде⁵ в диапазоне температур от 5 до 25 °С с дискретностью 5 °С фиксировались измеренные значения времени распространения акустического сигнала на измерительной базе τ_{SV} и температуры T_{SV} ;

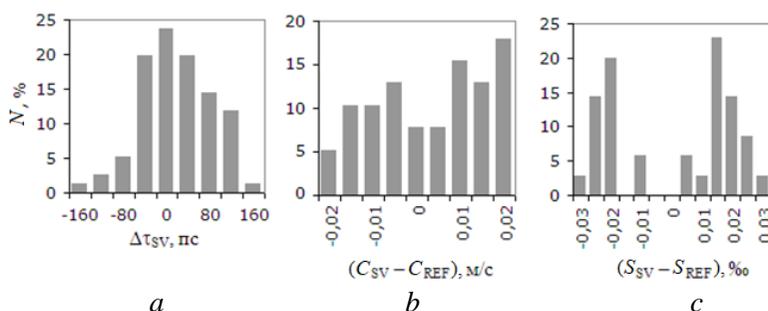
– для каждого значения температуры оценивалась эффективная длина измерительной базы $L_e(T_{SV}) = 0,5 \cdot C_{REF}(T_{SV}) \cdot \tau_{SV}$, где $C_{REF}(T_{SV})$ – значение скорости звука, рассчитанное по формуле Дель Гроссо для дистиллированной воды при температуре T_{SV} . Полученные таким образом ряды данных аппроксимировались линейной функцией $L_e(T_{SV})_{ap} = a_0 + a_1 \cdot T_{SV}$, где a_0, a_1 – коэффициенты;

– измеренные значения скорости звука рассчитывались по формуле

$$C_{SV} = 2 \cdot (a_0 + a_1 \cdot T_{SV}) / \tau_{SV}. \quad (1)$$

Погрешность аппроксимации функцией (1) – не более 0,01 м/с.

В процессе калибровки при фиксированной температуре воды оценивалась также случайная составляющая погрешности измерения времени τ_{SV} . Как видно из гистограммы на рис. 2, *a*, отклонения $\Delta\tau_{SV}$ результатов измерений τ_{SV} распределены в диапазоне $\pm 160 \cdot 10^{-12}$ с, что в единицах скорости звука соответствует $\pm 0,0025$ м/с.



Р и с. 2. Распределение отклонений $\Delta\tau_{SV}$ (*a*); сходимость результатов измерений скорости звука (*b*) и погрешность вычисления солёности (*c*) по данным долговременных лабораторных испытаний модуля SVT. N – количество отсчетов, %

Fig. 2. Distribution of deviations $\Delta\tau_{SV}$ (*a*); repeatability of the results of the sound velocity measurements (*b*) and the salinity calculation error (*c*) based on the long-term laboratory tests of the sound velocity and temperature module. N is a number of readings, %

Долговременная стабильность характеристик измерителей скорости звука и температуры исследовалась в лабораторных и натуральных условиях. Испытания проводились в течение нескольких месяцев в дистиллированной и морской воде.

Лабораторные испытания проводились в той же дистиллированной воде, в которой выполнялась калибровка. В испытаниях оценивались погрешность измерения температуры ΔT_{SV} кварцевым преобразователем ПТК-3М и сходимость результатов измерений скорости звука $C_{SV} - C_{REF}$, где C_{SV} – результаты

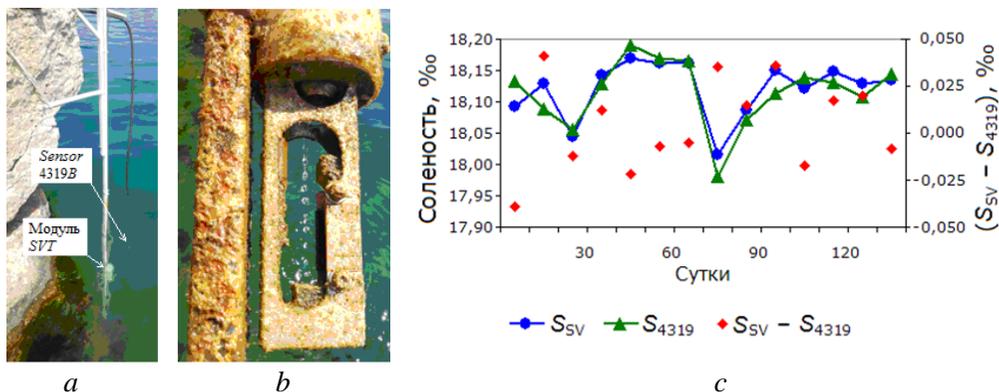
⁵ URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200159410> (дата обращения: 25.05.2020).

измерений скорости звука, рассчитанные в соответствии с выражением (1); C_{REF} – образцовые значения скорости звука, рассчитанные по формуле Дель Гроссо для дистиллированной воды. В отличие от калибровочной процедуры, температура воды измерялась платиновым термометром сопротивлений ПТС-10 с погрешностью не более 0,002 °С. В результате испытаний, которые проводились в течение нескольких месяцев при различных температурах воды, диапазон флуктуаций отклонений $C_{SV} - C_{REF}$ составил $\pm 0,02$ м/с (рис. 2, *b*), а погрешность измерения температуры ΔT_{SV} – не более 0,004 °С. Полагая, что соленость изменяется приблизительно на 0,75 ‰ при изменении скорости звука на 1 м/с и на 3,3 ‰ при изменении температуры на 1 °С, полученные оценки соответствуют погрешности вычисления солености $\sim 0,02$ ‰.

При лабораторных и натурных испытаниях в морской воде соленость в зависимости от скорости звука и температуры рассчитывалась по уравнению, предложенному в статье [8, с. 813–817]. Отметим, что это одна из наиболее значимых, по нашему мнению, работ, где проблема вычисления солености рассматривается с учетом возможностей современных средств измерения скорости звука.

При лабораторных испытаниях результаты вычисления солености по измеренным значениям скорости звука и температуры S_{SVT} сопоставлялись с данными лабораторного солемера S_{REF} , погрешность которого не более 0,002 ‰. С учетом того, что дрейфтер с модулем *SVT* разрабатывался для наблюдений физических полей верхнего слоя открытых районов Черного моря, испытания проводились в диапазонах температуры от 5 до 25 °С и солености от 10 до 25 ‰. В результате долговременных испытаний диапазон отклонений $S_{SV} - S_{REF}$ составил $\pm 0,03$ ‰ (рис. 2, *c*).

Устойчивость характеристик модуля *SVT* к воздействию биологического обрастания и загрязнения оценивалась в натурных испытаниях, которые проводились в прибрежной зоне Черного моря. В этих испытаниях значения солености S_{SV} по данным модуля *SVT*, сопоставлялись с соленостью S_{4319} по данным измерителя *Sensor 4319B* (*Aanderaa*, Норвегия). Погрешность вычисления солености S_{4319} по результатам дополнительной калибровки измерителей электропроводимости и температуры *Sensor 4319B* – не более 0,02 ‰. Оба прибора были установлены на кронштейне, закрепленном на скале (рис. 3, *a*). Испытания проводились в течение более четырех месяцев в весенне-летний период в условиях интенсивного обрастания, последствия которого показаны на рис. 3, *b*. Измеритель *Sensor 4319B* с целью исключения влияния обрастания и загрязнения помещался в исследуемую среду только на время сопоставлений. В результате испытаний диапазон отклонений $S_{SV} - S_{4319}$ составил $\pm 0,05$ ‰ (рис. 3, *c*). Относительно большие расхождения связаны с методической погрешностью, обусловленной пространственным расположением приборов, – по рекомендациям производителя для корректных измерений электропроводимости в радиусе $\sim 0,5$ м от измерителя *Sensor 4319B* не должно быть посторонних предметов. Несмотря на это обстоятельство, результаты испытаний свидетельствуют о хорошей долговременной стабильности характеристик модуля *SVT* в натурных условиях.



Р и с. 3. Расположение модуля SVT и измерителя *Sensor 4319B* во время сопоставительных натуральных испытаний (a); внешний вид датчика ИСЗ модуля SVT через 60 сут после начала испытаний (b); результаты сопоставлений солености S_{SV} по данным модуля SVT с соленостью S_{4319} по данным измерителя *Sensor 4319B* (c)

F i g. 3. Location of the sound velocity and temperature module and the *Sensor 4319B* during the comparative *in situ* tests (a); appearance of the sound velocity sensor in 60 days after the tests began (b); results of comparison of the salinity S_{SV} from the sound velocity and temperature module with the salinity S_{4319} from the *Sensor 4319B* (c)

Следует уточнить, что при испытаниях мы не использовали какие-либо меры по защите модуля от биологического обрастания и загрязнения по следующим причинам, основанным на результатах анализа, приведенных в статье [14]. Применение активных методов защиты путем ультрафиолетового облучения датчика скорости звука, его механической или акустической очистки исключено, поскольку модуль ориентирован на применение в составе дрейфтера с автономным электропитанием, а реализация этих методов требует значительных энергетических затрат. Методы пассивной защиты применимы практически ко всем внешним поверхностям датчика скорости звука, однако возможность применения этих методов ограничивается тем обстоятельством, что мы в настоящее время не располагаем объективной информацией о результатах длительного использования различных протекторов и покрытий и их влияния на химический состав исследуемой среды, а следовательно, и на скорость звука в среде. Результаты наших исследований также пока не позволяют в достаточной степени определенно судить о возможности применения пассивных методов защиты.

В качестве характеристик модуля SVT мы привели предельные оценки неопределенности измеряемых параметров, полученные при испытаниях. Это, наряду с описаниями методов исследований, дает представление о действительных характеристиках модуля и их долговременной стабильности. Аналогичные оценки были получены при испытаниях пяти экземпляров модуля SVT.

Заклучение. В статье рассмотрены результаты разработки и исследования характеристик модуля SVT, ориентированного на применение в автономном дрейфтере для долговременного мониторинга полей солености верхнего

слоя моря. Соленость вычисляется по результатам измерений скорости звука и температуры (в отличие от традиционного метода расчета по электропроводимости и температуре). В модуле SVT использовался измеритель скорости звука, специально разработанный с учетом особенностей необслуживаемой долговременной эксплуатации в составе дрейфера. Количественные оценки характеристик модуля SVT получены в результате многомесячных лабораторных и натурных испытаний. По результатам лабораторных испытаний диапазон отклонений результатов измерений скорости звука составил $\pm 0,02$ м/с, погрешность измерений температуры – не более $0,004$ °С; диапазон отклонений результатов вычислений солености в морской воде – $\pm 0,03$ ‰.

Применительно к основной цели выполненных исследований – созданию автономного дрейфера для мониторинга полей солености верхнего слоя моря – существенное значение имеет долговременная стабильность характеристик измерительных каналов дрейфера. По результатам выполненных натурных исследований в условиях загрязнения и биологического обрастания сходимость значений солености, рассчитанных по данным модуля SVT, находилась в диапазоне $\pm 0,05$ ‰, что позволяет рассчитывать на устойчивость характеристик разработанного измерителя скорости звука в реальных условиях длительной необслуживаемой эксплуатации в составе дрейфера.

Мы оцениваем полученные результаты как предварительные. Тем не менее они дают основания для проведения дальнейших исследований, направленных на совершенствование метода определения вторичных гидрологических параметров по данным прямых измерений скорости звука. Создание высокоточных измерителей скорости звука и методов адекватного оценивания их характеристик позволит исследовать свойства морской воды без ограничений, присущих традиционному способу вычисления этих параметров по результатам измерения электропроводимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мотыжев С. В., Лунев Е. Г., Толстошеев А. П. Опыт применения барометрических дрейферов для исследований Арктического региона Мирового океана // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 53–63. doi:10.22449/0233-7584-2016-4-53-63
2. Мотыжев С. В., Лунев Е. Г., Толстошеев А. П. Опыт применения автономных дрейферов в системе наблюдений ледовых полей и верхнего слоя океана в Арктике // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 54–68. doi:10.22449/0233-7584-2017-2-54-68
3. Validation of salinity data from surface drifters / G. Reverdin [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. Vol. 31, iss. 4. P. 967–983. doi:10.1175/JTECH-D-13-00158.1
4. Hormann V., Centurioni L. R., Reverdin G. Evaluation of drifter salinities in the Subtropical North Atlantic // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Vol. 32, iss. 1. P. 185–192. doi:10.1175/JTECH-D-14-00179.1
5. Sea surface salinity observations with Lagrangian drifters in the Tropical North Atlantic during SPURS: Circulation, fluxes, and comparisons with remotely sensed salinity from Aquarius / L. R. Centurioni [et al.] // Oceanography. 2015. Vol. 28, no. 1. P. 96–105. doi:10.5670/oceanog.2015.08
6. Near-surface salinity and temperature structure observed with dual-sensor drifters in the subtropical South Pacific / S. Dong [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 5952–5969. doi:10.1002/2017JC012894

7. Sea surface salinity quality control processes for potential use on data buoy observations. WMO, 2011. (DBCP Technical Document ; No. 42). URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7078 (date of access: 24.05.2020).
8. A new salinity equation for sound speed instruments / J. T. Allen [et al.] // *Limnology and Oceanography, Methods*. 2017. Vol. 15, iss. 9. P. 810–820. doi:10.1002/lom3.10203
9. *Von Rohden C., Fehres F., Rudtsch S.* Capability of pure water calibrated time-of-flight sensors for the determination of speed of sound in seawater // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015. Vol. 138, iss. 2. P. 651–662. doi:10.1121/1.4926380
10. *Бабий В. И., Толстошеев А. П.* Рабочие средства измерения скорости звука в морской среде. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. 36 с.
11. *Мелешко Е. А.* Интегральные схемы в наносекундной ядерной электронике. Изд. 2-е, доп. М.: Атомиздат, 1978. 216 с.
12. *Бабий В. И.* О метрологии скорости звука в жидкости // *Акустический журнал*. 2017. Т. 63, № 3. С. 251–264. doi:10.7868/S0320791917030030
13. *Del Grosso V. A., Mader C. W.* Speed of sound in pure water // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1972. Vol. 52, iss. 5B. P. 1442–1446. doi:10.1121/1.1913258
14. *Delauney, L., Compère, C., Lehaitre M.* Biofouling protection for marine environmental sensors // *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, iss. 2. P. 503–511. doi:10.5194/os-6-503-2010

Об авторах:

Толстошеев Алексей Петрович, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0771-0879**, **ResearcherID: G-1901-2014**, **Scopus Author ID: 23994548500**, tolstosheev@marlin-yug.com

Лунев Евгений Геннадьевич, научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7138-3024**, **Scopus Author ID: 23994266100**, lunev@marlin-yug.com

Мотыжев Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8438-2602**, **Scopus Author ID: 6507354504**, motyzhev@marlin-yug.com

Дыкман Владимир Захарович, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, zaharovich_41@mail.ru