

УДК 551.46.08

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ АВТОНОМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛЕННОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2022 г. Член-корреспондент РАН Г. К. Коротаев<sup>1</sup>, А. П. Толстошеев<sup>2,3</sup>, Е. Г. Лунев<sup>2,3</sup>, С. В. Мотыжев<sup>2,3</sup>, В. З. Дыкман<sup>1,3</sup>, С. Ф. Пряхина<sup>1,\*</sup>

Поступило 18.11.2021 г.

После доработки 20.12.2021 г.

Принято к публикации 21.12.2021 г.

Представлены первые результаты долговременных наблюдений солёности в поверхностном слое Чёрного моря по данным двух дрейфтеров-солемеров, запущенных в апреле 2021 г. Поверхностная солёность восстанавливается по данным одновременных измерений скорости звука и температуры морской воды, что обеспечивает сохранение метрологических характеристик измерительных каналов в условиях биологического обрастания. Анализ синхронных наблюдений на двух буйах показывает, что погрешность вычислений солёности находится в диапазоне  $\pm 0.03\%$ . Изменения солёности морской воды по данным одного из дрейфтеров с 14 апреля по 2 августа 2021 г. сопоставлены со значениями солёности вдоль траектории дрейфа буйа, построенными на основе анализов службы морских прогнозов программы “Коперник”. Общие тенденции изменения солёности по данным наблюдений и анализов хорошо соответствуют друг другу. Вместе с тем выявлен ряд существенных неточностей анализов службы морских прогнозов в центрах круговоротов и в районах поверхностных фронтов.

*Ключевые слова:* поверхностная солёность, скорость звука, дрейфтер, оперативные наблюдения, оперативные морские прогнозы

DOI: 10.31857/S2686739722040077

В течение последних трех десятилетий в развитых странах мира в приоритетном порядке развиваются исследования в области оперативной океанологии – новой ветви океанологической науки. Результатом развития оперативной океанологии являются создание сети оперативных наблюдений и внедрение систем прогноза состояния морской среды, своеобразных “служб погоды” в Мировом океане [1]. Наблюдательная и прогностические системы дают надёжную информацию о трёхмерных полях температуры и солёности морской воды, а также скорости течений в любой

точке Мирового океана [2]. Знание текущего состояния морской среды позволяет повысить эффективность принятия управленческих решений при реализации проектов промышленного освоения ресурсов Мирового океана и обеспечивать безопасность морского судоходства.

Созданная в последнее время глобальная сеть оперативных наблюдений основывается на сочетании дистанционных наблюдений с ИСЗ и контактных наблюдений со свободно-дрейфующих платформ. Использование автономных свободно-дрейфующих платформ в качестве носителей измерительных комплексов существенно сокращает стоимость обслуживания наблюдательной сети. Комбинация контактных наблюдений, производящихся на поверхностных дрейфующих буйах (дрейфтерах), и дистанционных наблюдений поверхности океана в ИК-диапазоне спектра позволяет с высокой точностью восстанавливать глобальное распределение температуры поверхности океана (ТПО). Наблюдения ТПО исключительно

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт Российской академии наук, Севастополь, Россия

<sup>2</sup>ООО “Марлин-Юг”, пос. Матвеев Курган, Матвеево-Курганский район, Ростовская область, Россия

<sup>3</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

\*E-mail: odop@mhi-ras.ru

важны для производства качественных морских прогнозов, поскольку даже лучшие модели метеорологических прогнозов воспроизводят потоки тепла на океанской поверхности с заметными погрешностями. Еще большей проблемой является надежное воспроизведение влагообмена атмосферы и океана моделями оперативных метеорологических прогнозов. В итоге возникают заметные сложности в точности расчета поверхностной солености в моделях морских прогнозов. Частичное решение этой проблемы дают спутниковые измерения поверхностной солености по данным дистанционных измерений с ИСЗ в микроволновом диапазоне спектра электромагнитного излучения океана [3]. Однако эти наблюдения имеют довольно грубое пространственное разрешение, что не позволяет с хорошей подробностью воспроизводить характеристики фронтальных разделов в океане. Кроме того, использование микроволновых наблюдений затруднительно в прибрежных районах, окраинных и внутренних морях, т.к. боковые лепестки радиометров захватывают сушу и вносят неконтролируемые погрешности.

В этой связи перспективным подходом для наблюдений поверхностной солености является использование дрейфтеров. Сеть дрейфтеров-солемеров должна дать такой же эффект в оперативном уточнении распределения солености поверхностного слоя моря, как и при измерениях ТПО. Данные наблюдений с дрейфтеров позволяют проводить наблюдения с высоким временным разрешением, что выгодно отличает их от буев-профилемеров программы АРГО, восстанавливающих профиль солености раз в семь–десять дней и не всегда в приповерхностном слое моря. Высокое временное разрешение дает возможность фильтровать высокочастотные сигналы, возмущающие данные измерений с буев-профилемеров и достоверно воспроизводить характеристики поверхностных халинных фронтов. Таким образом, размещение на дрейфтерах надежных средств наблюдений солености морской воды дает возможность значительно повысить точность восстановления поверхностной солености и соответственно улучшить качество воспроизведения влагообмена атмосферы и океана в моделях морских и метеорологических прогнозов.

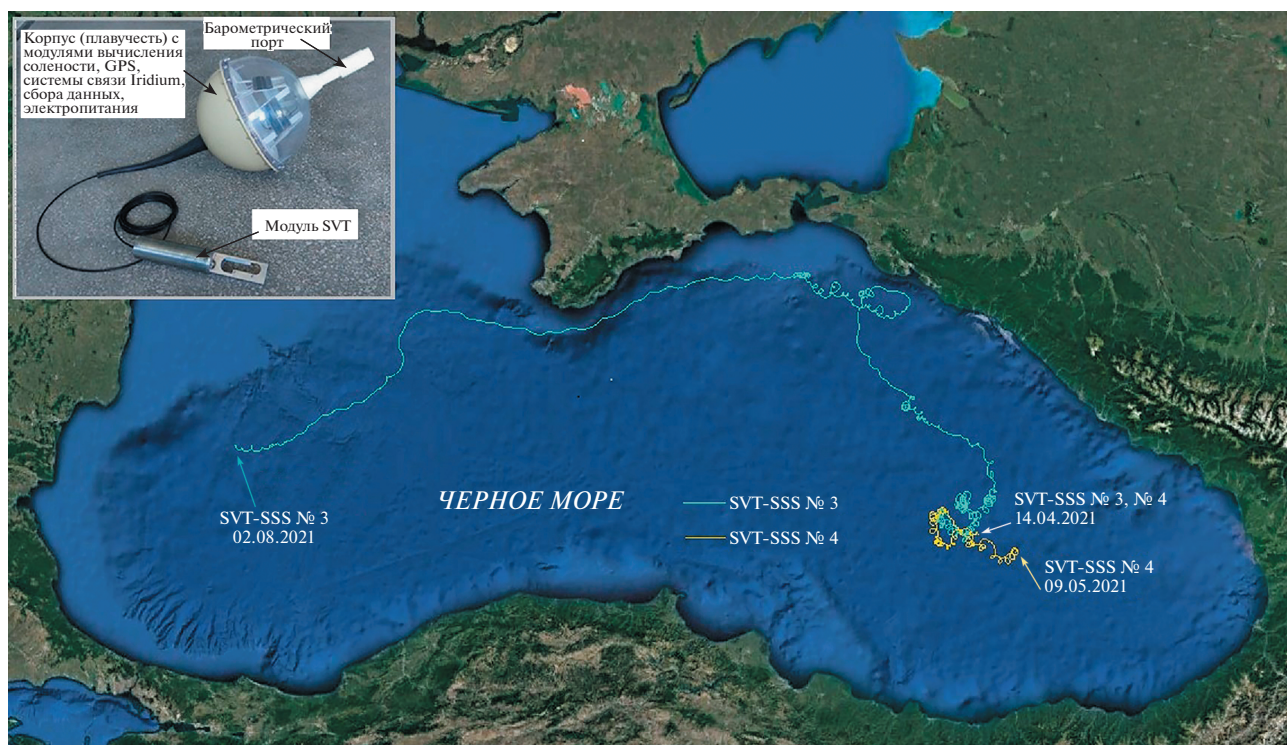
Однако проведение долговременных автономных наблюдений солености морской воды традиционными измерительными средствами оказывается затруднительным. В реализованных на настоящее время дрейфтерах-солемерах [4–8], где соленость вычисляется традиционным методом по данным прямых измерений электропроводимости и температуры, наиболее часто используются модули SBE 37 или SBE 47 (Sea-Bird Electronics, США). Характеристики этих модулей позволяют вычислять соленость с погрешностью не более 0.003‰. Однако реальная погрешность

определения солености оказывается много большей и может достигать нескольких промиллей согласно данным работ [4–7]. В отмеченных работах выделяются как долговременные тренды характеристик измерителей по причине загрязнения и биологического обрастания измерительной ячейки датчика электропроводимости, так и выбросы, связанные с попаданием пузырьков воздуха. Используя доступные наблюдения со спутников или буев Арго, удается провести отбраковку или коррекцию наблюдений с дрейфтеров [4]. К сожалению, эти процедуры не допускают автоматической обработки [5].

Альтернативный метод вычисления солености основан на прямых измерениях скорости звука [8, 9], однако из-за низкой точности таких измерений его реализация до недавнего времени не находила широкого применения на практике. В последние годы появилась возможность использования высокоточных измерителей скорости звука, что существенно меняет ситуацию.

В Морском гидрофизическом институте РАН в рамках государственного задания по теме “Развитие методов и средств оперативной океанологии для исследований изменчивости полей Черного моря” Программы фундаментальных научных исследований президиума РАН № 20 “Новые вызовы климатической системы Земли” на 2019 г. на основе высокоточного измерителя скорости звука разработан новый измерительный комплекс, позволяющий при относительно невысокой стоимости проводить качественные автономные наблюдения поверхностной солености с сохранением метрологических характеристик измерительных каналов в условиях загрязнения, биологического обрастания и других воздействующих факторов в течение длительного времени. Соленость при этом вычисляется по результатам измерений скорости звука и температуры морской воды [10].

В измерителе скорости звука, SVT-модуле, используется двухбазовый акустический датчик, конструкция которого позволяет обеспечить его защиту от биологического обрастания простыми пассивными методами. При финансовой и технической поддержке научно-производственного предприятия ООО “Марлин-Юг” были проведены долговременные лабораторные и натурные испытания модуля SVT при интенсивном биологическом обрастании. По результатам лабораторных испытаний установлено, что диапазон отклонений результатов измерений скорости звука составил  $\pm 0.02$  м/с, погрешность измерений температуры – не более 0.004°C, а диапазон отклонений результатов вычислений солености в морской воде  $\pm 0.03$ ‰ [11]. Таким образом, разработанный новый измерительный модуль SVT, будучи размещенным на дрейфтере, является перспективным инструментом для долговременных



**Рис. 1.** Внешний вид дрейфера-солемера SVT-SSS (вверху слева) и траектории дрейфов дрейферов SVT-SSS № 3 и № 4 на 02.08.2021.

автономных наблюдений поверхностной солёности с высоким временным разрешением.

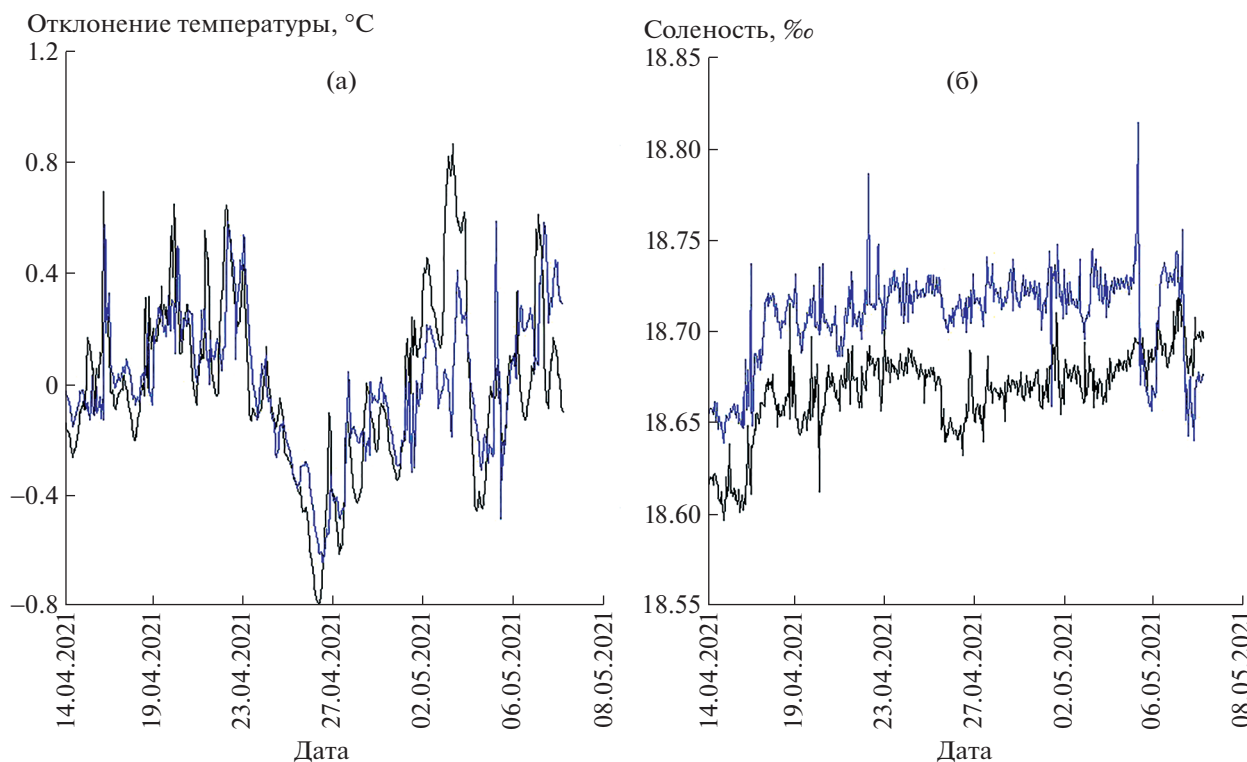
После завершения лабораторных и натурных испытаний модули SVT были установлены на два автономных дрейфера-солемера SVT-SSS, изготовленных ООО «Марлин-Юг» за счет средств проекта государственного задания. Внешний вид дрейфера-солемера показан на рис. 1 слева вверху. SVT-модули расположены на горизонтах 3 м (SVT-SSS № 3) и 5 м (SVT-SSS № 4). Как видно на рис. 1, изготовленные дрейферы имеют простейшую конструкцию. Выбранный сознательно упрощенный дизайн позволяет проводить измерения в водных массах с различными термохалинными свойствами, поскольку на дрейфер помимо морских течений воздействует ветер.

Оба дрейфера были запущены 14.04.2021 в восточной части Черного моря. В течение их автономного дрейфа в реальном масштабе времени через систему «Иридиум» с интервалом 1 ч передавались результаты синхронных измерений скорости звука, температуры и рассчитанной по этим параметрам солёности в приповерхностном слое моря. Траектории дрейфа буйев представлены на рис. 1. Буй SVT-SSS № 4 передавал измерения вплоть до 9.05.2021. Буй SVT-SSS № 3 продолжает проводить измерения более четырех месяцев.

В течение всего времени совместных наблюдений двух буйев температура как на глубине 3 м, так

и на глубине 5 м демонстрировала линейный рост во времени в силу сезонного прогрева. Отметим, что скорость прогрева на глубине 5 м была несколько меньшей, чем на глубине 3 м. Отклонения значений температуры от линейного тренда представлены на рис. 2а. На рисунке видны синхронные колебания этих отклонений на двух горизонтах, где проводились измерения. На рис. 2б представлена восстановленная солёность воды в течение всего времени совместных наблюдений.

На этом рисунке видно, что колебания солёности на двух горизонтах также происходят почти синхронно вплоть до 5 мая. Синхронность колебаний температуры и солёности по измерениям на обоих буйах показывает, что они все это время находились в водных массах с близкими термохалинными характеристиками. Это позволяет провести оценку точности измерений солёности. С этой целью вычислена разность синхронных наблюдений солёности на двух глубинах. В среднем солёность на глубине 5 м оказалась выше ее значения на глубине 3 м на 0.04‰. Это указывает на наличие небольшого вертикального градиента солёности в верхнем слое моря. Среднеквадратичное отклонение при этом оказалось равным 0.0156‰. Предполагая полную однородность водной массы, в которой дрейфовали буйи, и независимость ошибок измерений каждого из датчиков, получим оценку точности измерений в



**Рис. 2.** Отклонения температуры морской воды от линейного тренда (а); изменение солёности морской воды (б). Черная линия – на глубине 3 м, синяя линия – на глубине 5 м.



**Рис. 3.** Наблюдаемые (черная линия) и восстановленные по данным анализов CMEMS (синяя линия) изменения солёности поверхностного слоя вод Черного моря вдоль траектории движения дрейфера SVT-SSS № 3 с середины апреля по начало августа 2021 г.

0.01‰. Это значение хорошо соответствует диапазону отклонений результатов вычислений солёности в морской воде в  $\pm 0.03‰$ , полученному на основе предварительных лабораторных и натурных испытаний.

Как отмечалось выше, буй SVT-SSS № 3 продолжает успешную работу более четырех месяцев. Накопленный длинный ряд прямых наблюдений солёности поверхностного слоя вод Черного моря позволяет продемонстрировать эффективность предлагаемого измерительного комплекса для повышения качества оперативных морских прогнозов. На рис. 3 приведено изменение солёности морской воды по данным измерений дрейфтером-солемером в сопоставлении с аналогичными значениями солёности морской воды на горизонте 2.5 м, построенными на основе анализов службы морских прогнозов программы “Коперник” (Copernicus Marine Environmental Monitoring Service, CMEMS) [12].

На рис. 3 видно, что общие тенденции изменения солёности поверхностного слоя вод Черного моря вдоль траектории дрейфа буя достаточно хорошо соответствуют друг другу. В мае, когда дрейфтер находился вблизи центра восточного круговорота, солёность поверхностных вод имеет наибольшие значения. В обоих наборах данных выделяется пересекаемый дрейфтером фронталь-

ный раздел со значительным понижением солёности. Затем, по мере смещения дрейфера к центру западного круговорота, наблюдается постепенное повышение солёности вдоль траектории буя.

Однако следует отметить ряд существенных отклонений анализов СМЕМС от наблюдений с дрейфера, возможно, обусловленных качеством воспроизведения влагообмена в метеорологических прогнозах, используемых в качестве граничных условий в модели циркуляции вод Черного моря. Так, солёность вблизи центра восточного круговорота по данным анализов СМЕМС оказывается завышенной примерно на 0.3–0.5‰, что весьма существенно. Также заметно превышение солёности по результатам анализов СМЕМС над наблюдениями при продвижении буя к центру западного черноморского круговорота примерно на 0.3‰. На графиках, представленных на рис. 3, видно также, что результаты анализа СМЕМС неточно воспроизводят положения выделяющихся по наблюдениям фронтальных разделов, причем отдельные фронты вообще не воспроизводятся. В итоге в этих районах рассчитанная в анализах солёность отличается от наблюдаемой на несколько десятых промилле. На рис. 3 видно также, что прогностическая модель, используемая в СМЕМС, завышает ширину фронтов. Развертывание сети дрейферов-солемеров предложенной уникальной конструкции, позволяющих проводить долговременные измерения солёности морской воды с хорошей достоверностью, позволит посредством ассимиляции избавить морские анализы и прогнозы от подобных ошибок и таким образом значительно повысить их качество.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Государственного задания по теме “Развитие методов и средств оперативной океанологии для исследований изменчивости полей Черного моря” Программы фундаментальных научных исследований президиума РАН № 20 “Новые вызовы климатической системы Земли” и Государственного задания по теме № 0555–2021–0003 на 2021 г. “Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений” (шифр “Оперативная океанология”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pugh D., Holland G.* Ocean Observations – the Global Ocean Observing System (GOOS) // *Troubled Waters: Ocean Science and Governance*. Cambridge: CUP. 2010. P. 161–178.
2. *Le Traon P.Y., Ali A., Alvarez Fanjul E., et al.* The Copernicus Marine Environmental Monitoring Service:

Main Scientific Achievements and Future Prospects // *Mercator. Ocn. Journal* 2017. 56. P. 101.  
<https://doi.org/10.25575/56>

3. *Boutin J., Vergely J.L., Marchand S., et al.* New SMOS Sea Surface Salinity with Reduced Systematic Errors and Improved Variability // *Remote Sens. Environ.* 2018. 214. P. 115–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.022>
4. *Reverdin G., Morisset S., Boutin J., et al.* Validation of Salinity Data from Surface Drifters // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. V. 31. P. 967–983.  
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00158.1>
5. *Hormann V., Centurioni L., Reverdin G.* Evaluation of Drifter Salinities in the Subtropical North Atlantic // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. P. 185–192.  
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00179.1>
6. *Centurioni L., Hormann V., Chaet Yi.* Sea Surface Salinity Observations with Lagrangian Drifters in the Tropical North Atlantic During SPURS: Circulation, Fluxes, and Comparisons with Remotely Sensed Salinity from Aquarius // *Oceanography (Washington D.C.)*. 2015. V. 28. P. 96–105.  
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.08>
7. *Dong S., Volkov D.L., Goni G., et al.* Near-surface Salinity and Temperature Structure Observed with Dual-sensor Drifters in the Subtropical South Pacific // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. P. 5952–5969.  
<https://doi.org/10.1002/2017JC012894>
8. *Lovett J.R.* Determination of Salinity from Simultaneous Measurements of Sound Velocity, Temperature and Pressure // *Limnol. Oceanogr.* 1968. 13. P. 557–559.  
<https://doi.org/10.4319/lo.1968.13.3.0557>
9. Способ определения солёности и плотности морской воды. Патент WO 2009014467 A2, опубликован 29.01.2009 г. Доступно на:  
<https://patents.google.com/patent/WO2009014467A2>.
10. *Allen J.T., Keen P.W., Gardiner J., et al.* A New Salinity Equation for Sound Speed Instruments *Limnol // Oceanogr.: Methods*. 2017. V. 15. P. 810–820.  
<https://doi.org/10.1002/lom3.10203>
11. *Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В. и др.* Модуль оценивания солёности морской воды на основе измерений скорости звука // *Морской гидрофизический журн.* 2021. Т. 37. № 1. С. 132–142.  
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-1-132-142>
12. Copernicus Marine Services, СМЕМС. Доступно по : <https://marine.copernicus.eu/> Дата обращения 02.08.2021.

## LONG-TERM AUTONOMOUS OBSERVATIONS OF SEA WATER SALINITY IN THE SURFACE LAYER OF THE BLACK SEA

Corresponding Member of the RAS **G. K. Korotaev<sup>a</sup>, A. P. Tolstosheev<sup>b,c</sup>, E. G. Lunev<sup>b,c</sup>, S. V. Motyzhnev<sup>b,c</sup>,  
V. Z. Dykman<sup>a,b</sup>, and S. F. Pryakhina<sup>a,#</sup>**

<sup>a</sup>*Federal Research Center “Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences”, Sevastopol, Russian Federation*

<sup>b</sup>*JSC “Marlin-Yug”, pos. Matveev Kurgan, Matveevo-Kurganskiy region, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: odop@mhi-ras.ru*

The paper represents the results of pioneering long-term observations of surface layer salinity of the Black Sea by means of two drifters deployed in April 2021. Surface salinity is restored based on data from simultaneous measurements of the sound speed and temperature of seawater, which ensures the preservation of the metrological characteristics of the measuring channels under conditions of biological fouling. Analysis of synchronous observations on two buoys allowed us to confirm that the error in calculation of salinity is in the range of  $\pm 0.03\%$ . The variability of sea surface layer salinity according to one of the drifters from April 14 to August 2, 2021 was compared with the salinity along the trajectory of the drifter, based on the analysis of the marine forecast service of the Copernicus program. The general trends in salinity changes according to observational and analytical data corresponds quite well to each other. At the same time, a number of significant inaccuracies were identified in the analyses of the marine forecast service in the centers of gyres and in the areas of surface fronts were revealed

*Keywords:* surface salinity, speed of sound, drifter, operational observations, operational marine forecasts