

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.
3. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
5. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2004. 235 с.
6. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. № 27. P. 48–156.
7. Бреховских Л.М. О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде // Изв. АН СССР. Серия физическая. 1949. Т. 13, № 5. С. 505–545.
8. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Медленные обобщённые волны и генерация вихревых структур в акустике слоистых сред // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 37–51.
9. Щуров В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С., Иванова Г.Ф., Черкасов А.В. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 58–67.
10. Щуров В.А., Щуров А.В. Помехоустойчивость гидроакустического комбинированного приёмника // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 1. С. 110–119.

УДК 53.088.228

КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ STD-ЗОНДАМИ «SEA-BIRD» В ЯПОНСКОМ МОРЕ

**Д.Д. Каплуненко¹,
А.Ю. Лазарюк^{1,2},
В.Б. Лобанов¹,
С.Г. Сагалаев¹**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Дальневосточный федеральный университет²

Данные современных высокоточных гидрологических зондов (SBE 911 plus) нуждаются в дополнительной коррекции из-за конструктивных особенностей используемых датчиков температуры (SBE 3 plus), электропроводности (SBE 4C) и содержания растворенного кислорода (SBE 43 и Rinko III). В данной работе рассматриваются результаты глубоководных измерений STD-зондами, выполненных в Японском море в 2012–2014 гг. Основное внимание уделено повышению точности исходных данных, а именно вертикальных профилей основных гидрологических параметров: температуры, солёности, содержания кислорода, необходимых для изучения климатических изменений в Мировом океане и Японском море.

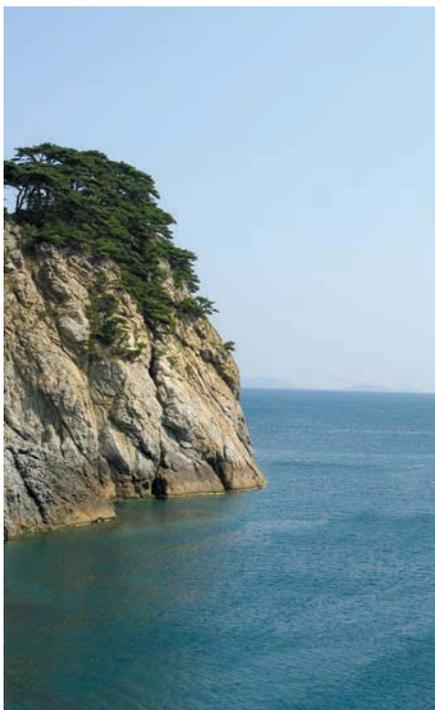
1. ВВЕДЕНИЕ

Японское море является водным бассейном окраинного типа, находящимся в субарктической и субтропической зонах, с ярко выраженным муссонным климатом. Структура циркуляции его вод и наличие фронтальных разделов делает его похожим на Мировой океан в миниатюре [1, 2]. При этом характеристики глубинных вод моря (температура, солёность и содержание растворённого кислорода) подвержены сравнительно малым изменениям. Наиболее однородное распределение характеристик, как по вертикали, так и по площади бассейна отмечается в придонном слое на глубинах более 2000 м, известном как адиабатический слой [1, 3]. Согласно нашим наблюдениям, вертикальные из-

менения потенциальной температуры воды в пределах адиабатического слоя не превышают 0,002°C, а горизонтальное – 0,010°C. Анализ натурных данных, полученных в 1969–2007 гг., показал рост потенциальной температуры глубинных вод Японского моря на 0,050°C [4], а за период 1995–2013 гг. – на 0,031°C [5], в то время как для Мирового океана аналогичный тренд с 1955 по 1998 г. составил 0,037°C [6]. Содержание кислорода в глубинных слоях моря подвержено двадцатилетним колебаниям с максимальными изменениями до 0,7 мкмоль/кг в год [7]. Соответственно для оценки пространственно-временных мас-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423) 231-14-00. E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: (423) 243-32-80.



штабов вариаций гидрологических параметров предъявляются повышенные требования к точности измерительной аппаратуры.

2. Приборы и оборудование

В экспедициях ТОИ ДВО РАН в Японское море эксплуатируется измерительный комплекс SBE 911 plus компании «Sea-Bird Electronics», США [8], который обладает необходимой точностью для измерения вышеуказанных характеристик: по температуре – до $0,001^{\circ}\text{C}$, по солености – $0,003$ епс и 2% насыщения по кислороду (SBE 43) [9, 8]. Дополнительно для повышения точности определения концентрации кислорода используется оптический датчик Rinko III (JFE Advantech Co., Ltd., Япония), имеющий разрешающую способность до 0,04% насыщения.

При погружении SBE 911 plus в водную толщу возникают деформации в различных элементах термодатчика SBE 3 plus и кондуктометрической ячейки SBE 4C. На малых глубинах деформации ничтожны и не вносят заметных искажений в показания датчиков. Однако по мере увеличения глубины (давления) их вклад может возрастать [10].

В частности, термистор, чувствительный элемент SBE 3 plus, изготавливается из остеклованной капли металла, помещённой в тонкостенную иглу (внутренний диаметр 0,8 мм) [6]. По сопротивлению этой капли определяется температура измеряемой порции воды. При увеличении давления геометрия иглы изменяется и возможен контакт между её стенкой и остеклованной поверхностью металла [11]. Из-за дополнительной деформации кристаллической структуры капли металла изменяется её сопротивление. Этот эффект у большинства датчиков

SBE 3 plus приводит к завышению температуры на $0,0003^{\circ}\text{C}$ при погружении на 1 км [12].

Также в показаниях SBE 3 plus присутствует эффект вязкого трения, который возникает на поверхности иглы термистора при движении жидкости. Для датчиков этой модели добавка фиксирована (около $0,0005^{\circ}\text{C}$), т.к. игла термистора располагается внутри магистрального водовода, по которому вода перемещается практически с постоянной скоростью под воздействием помпы SBE 5T [6].

Перечисленные эффекты отсутствуют в показаниях глубоководного платинового термометра Deep Ocean Standards Thermometer SBE 35, т.к. корпус его чувствительного элемента свободно омывается водой исследуемого слоя, а сопротивление платиновой нити не зависит от давления [13, 11]. Дополнительными преимуществами термометра SBE 35 перед термистором SBE 3 plus являются более высокая стабильность и точность $0,0002^{\circ}\text{C}$. Однако из-за его большей инерционности (0,5 с против 0,065 с термистора) синхронные измерения этих двух датчиков выполнялись только во время остановки зонда при отборе проб воды на заданных горизонтах.

Кондуктометрическая ячейка, используемая в датчиках серии SBE 4, имеет три кольцевых платинизированных электрода шириной 10 мм, которые размещены (впаяны) внутри трубки из пирекса (специального стекла) длиной 190 мм. Внутренний диаметр трубки 7 мм, внешний 12 мм. Крайние электроды (пассивные) расположены симметрично на расстоянии 50 мм относительно центрального (активного). Внутренний диаметр трубки на участке между электродами сужен до 4 мм [14]. Вследствие малого диаметра проточного канала ячейки SBE 4 (по сути,

это капилляр), датчику требуется искусственная прокачка исследуемых порций морской воды. Для этого используется помпа SBE 5T.

Характерной особенностью этого типа датчиков является временной дрейф (как правило, в сторону уменьшения) измеряемых величин. Этот эффект вызван ростом контактного сопротивления ячейки из-за проникновения ионов солей морской воды в «рыхлую» платинизированную структуру кольцевых электродов. Дрейф в показаниях нового датчика SBE 4 может достигать $0,002$ мСм/см/мес, и в процессе его активной эксплуатации понижается в 2–3 раза [14]. Устраняется дрейф регулярной калибровкой ячеек SBE 4 на специальном лабораторном стенде.

Другой особенностью кондуктометрической ячейки SBE является термический эффект стеклянной трубки (Cell Thermal Mass). Он обуславливает завышение или занижение измеренных величин электропроводности в температурных градиентных слоях. Устраняется этот эффект при первичной обработке данных зондирования [15].

Кроме перечисленных эффектов в процессе зондирования, по мере увеличения глубины, происходит динамическое сжатие кондуктометрической ячейки, соответственно изменяются её геометрические параметры и объёмный показатель измеряемой порции морской воды. При повышенных требованиях к точности определения профиля солёности требуется дополнительная коррекция значений электропроводности, измеренных SBE 4C [10].

Рекомендации, изложенные в работе [16], для такой коррекции требуют проведения специального цикла работ, включающего отбор проб морской воды батометрами и определение солёности в отобран-

ных пробах на высокоточном лабораторном солемере, в специальном термостатируемом помещении непосредственно на борту экспедиционного судна, а также применения платинового термометра SBE 35 на горизонтах отбора проб в процессе зондирования. Если в качестве лабораторного солемера использовать модель Autosal 8400B (Guildline Instruments Ltd., Канада), то при тщательном исполнении цикла работ в течение всего рейса обеспечивается точность определения данных по солёности не хуже 0,002 епс [10].

Для измерения содержания растворенного в воде кислорода в стандартной комплектации зонда SBE911 используется мембранный датчик SBE 43. Он содержит компенсатор давления, но имеет большую инерционность, достигающую 4–8 с [9, 17], а также чувствителен к нефтяным и биологическим загрязнениям. При использовании малоинерционного оптодного датчика кислорода Rinko III результаты измерений будут зависеть от давления. Данные этих датчиков сравнивались с результатами лабораторного определения кислорода по методу Винклера [18] в пробах, отобранных батометрами на стандартных горизонтах.

3. Данные и методы

Обработка данных глубоководных зондирований, выполненных в Японском море в экспедициях 2012–2014 гг. в весенний, летний и осенний периоды, осуществлялась стандартными процедурами программы SBE-Data Processing Win32 [15], также выполнялась их дополнительная коррекция, учитывающая влияние высокого давления на датчики температуры, электропроводности (слои ниже 2000 м) и содержания кислорода (глубины более 900 м).

Профили температуры корректировались с учётом данных синхронных измерений SBE 3 plus и платинового термометра SBE 35 на стандартных горизонтах во время остановки зонда при отборе проб воды. Откорректированное значение температуры T_{cal} определялось по линейной формуле [10]:

$$T_{cal} = T_{raw} - (C_0 + C_1 \cdot P), \quad (1)$$

где T_{raw} – измеренное значение температуры, P – давление в точке коррекции, а C_0 , C_1 – коэффициенты коррекции значений температуры, которые рассчитывались индивидуально для каждого комплекта SBE 911 plus по разнице между показаниями SBE 35 и SBE 3 plus.

Для повышения точности определения профилей солёности требуется учёт значений солёности в отобранных пробах, измеренных термосоленографом в термостатируемом помещении [10]. В нашем случае, при работе в судовых условиях, такая возможность отсутствовала. Для дополнительной коррекции данных SBE 4C, полученных в экспедициях ТОИ ДВО РАН 2012–2014 гг., использовался архив Японского метеорологического агентства,

ЯМА [16]. Сопоставление профилей солёности было проведено по данным глубоководных зондирований, выполненных в Японской котловине в сравнительно близко расположенных точках и близких по времени (рис. 1). Для сравнения данных по температуре, солёности и содержанию кислорода в адиабатическом слое, полученных в различные годы (с 2012 по 2014) в рейсах ТОИ ДВО РАН, использовались результаты зондирований, выполненные на станциях в районе реперной точки (синий ромб).

В результате сравнения и анализа данных были определены коэффициенты уравнения коррекции электропроводности [10]:

$$C_{cal} = C - \left(\sum_{i=0}^I c_i \cdot C^i + \sum_{j=1}^J p_j \cdot P^j \right). \quad (2)$$

где C_{cal} – калиброванное значение электропроводности, c_i – коэффициенты коррекции значений электропроводности, p_j – поправочные коэффициенты по давлению.

Коррекция показаний датчиков SBE 43 и Rinko III была выполнена на основе результатов лабораторного определения кислорода методом Винклера

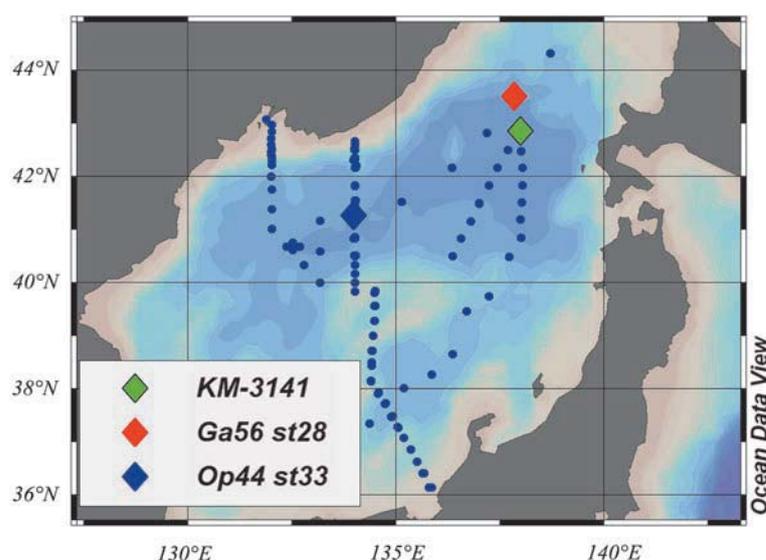


Рис. 1. Карта района работ в Японском море экспедиций ТОИ ДВО РАН и ЯМА. Станция KM-314 выполнена НИС «Кейфу Мару», октябрь 2012 г.; Ga56 st28 – в рейсе №56 НИС «Профессор Гагаринский», июнь 2012 г.; Op44 st33 – в рейсе №44 НИС «Академик Опарин», октябрь 2012 г.

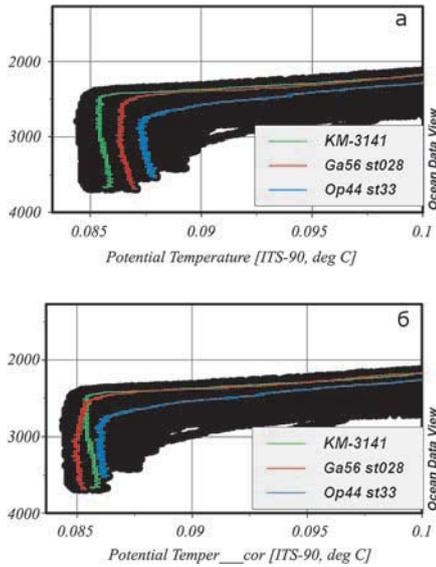


Рис. 2. Профили потенциальной температуры в глубинных слоях Японского моря, рассчитанные без учёта влияния эффекта давления на показания SBE 3 plus (а) и после выполненной коррекции (б). Цветом выделены профили для станций Ga56 st028, Op44 st33 (красный и синий профили), а также данные архива ЯМА (зеленый профиль, станция KM-314, НИС «Кейфу Мару», 2012 г.)

в пробах, отобранных на горизонтах от 900 до 3500 м. При определении коэффициентов уравнения коррекции отбирались данные, имеющие минимальное отклонение от средних значений по критерию 2δ . Откорректированные данные считались удовлетворительного качества, когда разница между показаниями датчиков и лабораторными измерениями не превышала 1 мкмоль/кг.

4. Обсуждение результатов

Результаты выполненной дополнительной коррекции данных глубоководных зондирований представлены на рис. 2–4. Коррекция температуры в промежуточных и глубинных слоях Японского моря показала, что кажущийся рост потенциальной температуры в придонном слое (рис. 2, а) является искажением вследствие неучтенного эффекта давления на датчик температуры (откорректированное значение – рис. 2, б).

При устранении эффекта давления на ячейку SBE 4С и возможного её дрейфа учитывались откорректированные значения температуры (по собственным данным), а также температура и солёность из архива ЯМА [16]. Полученные таким образом профили солёности (данные рейсов 2012 года) корректно отражают наличие слоя минимума солёности в глубинных водах Японской котловины (рис. 3).

Анализ данных содержания растворенного кислорода показал, что датчик Rinko III обладает определенными преимуществами перед SBE 43 в скорости и точности определения концентрации кислорода. Это подтверждается малым количеством отклонений от значений, определенных лабораторным методом за длительный период (рис. 4, а). Однако в процессе эксплуатации были выявлены его недостат-

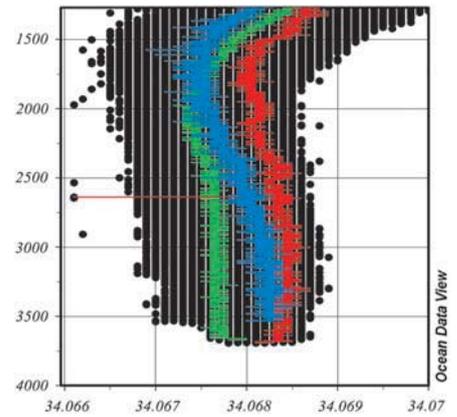


Рис. 3. Профили солёности в глубинных слоях Японской котловины, рассчитанные по данным рейсов ТОИ ДВО РАН 2012 г. после дополнительной коррекции. Красный и синий профили получены на станциях Ga56 st028 и Op44 st33, а зеленый соответствует данным KM-3141 (архив ЯМА)

ки, выражающиеся в возможности появления временного тренда в показаниях (рис. 4, б) при достаточно стабильных результатах определения кислорода по SBE 43.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенной работы показано, что при исследовании глубинных вод Японского моря представляется важным учет индивидуальных особенностей датчиков, выполняющих измерения основных гидрологических параметров. Точность измерений в данном случае может быть критичной для анализа факторов, влияющих на вертикальное распределение.

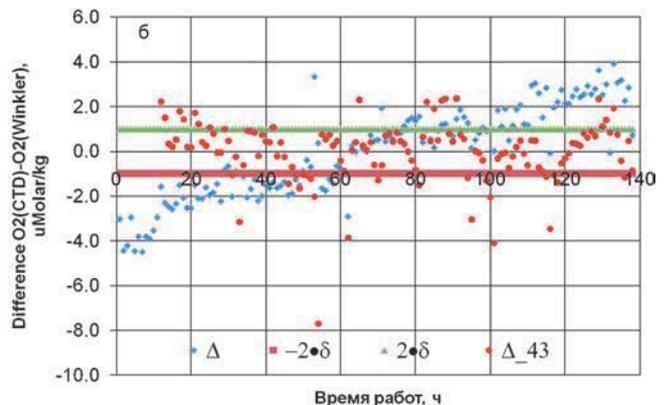
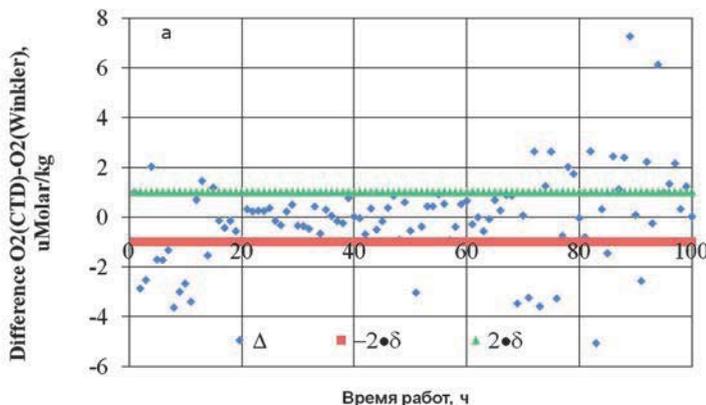


Рис. 4. Отклонения концентраций кислорода (Δ) по данным датчиков SBE 43 (красные точки) и Rinko III (синие точки) от значений, определенных методом Винклера в рейсах 2013 и 2014 гг. Исходное распределение Δ Rinko III относительно времени отбора пробы (а), и значения Δ , отобранные для коррекции по критерию 2δ (б). Границы критерия 2δ обозначены красной и зеленой линиями

ЛИТЕРАТУРА

1. Gamo T., Nozaki Y., Sakai H., Nakai T., Tsubota H. Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer // *J. Mar. Res.* 1986. Vol. 44, P. 781–793.
2. Senjyu T. The Japan Sea Intermediate Water: Its Characteristics and Circulation // *J. Oceanogr.* 1999. Vol. 55. P. 111–122.
3. Talley L.D., Tishchenko P.Ya., Luchin V. et al. Atlas of Japan (East) Sea Hydrographic Properties in Summer, 1999 // *Progress Oceanogr.* 2004. Vol. 61, № 2–4. P. 277–348.
4. Kim K., Chang K.-I., Kang D.-J. et al. Review of recent findings on the water masses and circulation in the East Sea (Sea of Japan) // *J. Oceanogr.* 2008. Vol. 64. N. 5. P. 721–735.
5. Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Sergeev A., Tishchenko P., Kaplunenko D., Sagalaev S., Voronin A. Variability of the Japan, East Sea bottom water, Marginal Seas in Change: the East Sea and the Mediterranean Sea // *Proc. Int. Workshop, November 6–8. SNU. Seoul, Korea, 2012.* P. 49–58.
6. Larson N., Pedersen A.M. Temperature measurements in flowing water: Viscous heating of sensor tips // *Proc. of the First IGHEM Meeting. Montreal, QC, Canada: International Group for Hydraulic Efficiency Measurement, 1996.* URL: http://www.seabird.com/technical_references/viscous.htm
7. Watanabe Yu. W., Wakita M., Maeda N. Synchronous bi-decadal periodic changes of oxygen, phosphate and temperature between the Japan Sea deep water and the North Pacific intermediate water // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30, No. 24.
8. Измерительный комплекс SBE 911 plus компании «Sea-Bird Electronics». URL: <http://www.seabird.com/sbe911plus-ctd> (дата обращения: 15.01.2015).
9. Датчик растворенного в воде кислорода SBE 43 компании «Sea-Bird Electronics». URL: <http://www.seabird.com/sbe43-dissolved-oxygen-sensor> (дата обращения: 15.01.2015).
10. WHP-P9(2010)_cruise_report. 94 p.
11. Uchida H., Ohyama K., Ozawa S., Fukasawa M. In-situ calibration of the Sea-Bird 9plus CTD thermometer // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2007. Vol. 24. P. 1961–1967.
12. Budeus G., Schneider W. In-situ temperature calibration: A remark on instruments and methods // *International WOCE Newsletter.* 1998. N. 30. P. 16–18.
13. Термометр SBE 35 компании «Sea-Bird Electronics». URL: <http://www.seabird.com/sbe35-thermometer> (дата обращения: 15.01.2015).
14. Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промышленно значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
15. Talley L.D., Tishchenko P.Ya., Luchin V. et al. Atlas of Japan (East) Sea Hydrographic Properties in Summer, 1999 // *Progress Oceanogr.* 2004. Vol. 61, N. 2-4. P. 277–348.
16. Данные океанографических наблюдений Японского Метеорологического Агентства для судна «Кейфу Мару». URL: http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/ship_e.php (дата обращения: 15.12.2014).
17. Sea-Bird Electronics SBE 43 dissolved oxygen (DO) sensor – hysteresis corrections, Application note no. 64-3. 2009. 7 p. URL: <http://www.seabird.com/document/an64-3-sbe-43-dissolved-oxygen-do-sensor-hysteresis-corrections> (дата обращения 15.01.2015).
18. Uchida H., Kawano T., Kaneko I., Fukasawa M. In-situ calibration of optode-based oxygen sensors // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2008. Vol. 25. P. 2271–2281.
19. Датчик электропроводности SBE 4C компании «Sea-Bird Electronics». URL: <http://www.seabird.com/sbe4-conductivity-sensor> (дата обращения: 15.01.2015).
20. Levitus S., Antonov J., Boyer T. Warming of the world ocean, 1955–2003 // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32.
21. McTaggart K.E., Johnson G.C., Johnson M.C., Delahoyde F.M., Swift J.H. Notes on CTD/O2 Data Acquisition and Processing using Sea-Bird hardware and software (as available) // *Go-Ship Repeat Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines. IOCCP Report No. 14. ICPO Publication Series N 134. Version 1.* 2010.

