

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ВОД НАД КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ СКЛОНОМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

А.Ю. Лазарюк¹, Д.Д. Каплуненко¹, А.Г. Островский², В.Б. Лобанов¹,
О.О. Трусенкова¹, С.Ю. Ладыченко¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041,
г. Владивосток, Балтийская, 43 e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36 e-mail: osasha@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

В 2015 г. были впервые проведены длительные (в течение полугода) непрерывные измерения термохалинной структуры вод над континентальным склоном северо-западной части Японского моря. Измерения проводились с помощью модуля SBE 52-MP STD, установленного на автономном профилографе Аквалог на притопленной заякоренной буйковой станции к востоку от залива Петра Великого в теплую часть года с 18 апреля по 15 октября. В статье представлен подход к первичной обработке данных STD-измерений океанологического профилирующего аппарата, включая специально разработанную программу обработки STDdata_cor_SBE_52-MP. Данные SBE 52-MP STD верифицированы с помощью измерений на станциях судового разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев», выполненного 30 мая поперек склона и пересекшего место установки Аквалога. Вертикальные профили температуры и солености по судовым измерениям и данным профилографа Аквалог хорошо согласуются, демонстрируя особенности изменения температуры, солености и вертикальной плотностной стратификации при прохождении мезомасштабного антициклонического вихря, перемещавшегося на юго-запад в области Приморского течения. Верификация измерений модулем SBE 52-MP STD по данным судовых зондирований SBE-911plus позволила устранить также и систематические компоненты погрешностей. В результате, качественные показатели гидрофизической информации, полученной профилографом Аквалог, удалось привести к стандартам WOCE. Для исследования вихря дополнительно были использованы спутниковые снимки температуры поверхности моря, полученные с помощью радиометра AVHRR ИСЗ NOAA. Пример анализа структуры синоптического вихря показывает перспективность подхода к экспериментальным гидрофизическим исследованиям, сочетающего использование длительных временных рядов наблюдений в толще вод наряду с судовыми разрезами и съемками акватории из космоса с помощью мультиспектральной аппаратуры в целях развития 4-х мерной океанографии.

Ключевые слова: заякоренный мобильный профилирующий аппарат, STD-зонд, T,S – зондирования, инфракрасные спутниковые изображения морской поверхности, Японское море, Приморское течение, вертикальная термохалинная структура вод, синоптический вихрь, 4-х мерная океанография.

Введение

Характерной особенностью акватории северо-западной части Японского моря является узкий шельф и крутые, до 10^{-1} , уклоны рельефа дна. По северной и западной периферии циклонических круговоротов в субарктической части моря наблюдаются холодные пограничные течения, которые следуют на юго-запад вдоль материкового склона. Звено этой циркуляционной системы между 42° и 48° с.ш. называется Приморским течением (Юрасов, Яричин, 1991). Неустойчивость пограничных течений приводит к образованию синоптических вихрей, перемещающихся вдоль континентального склона. Такие вихри, неоднократно наблюдались как на спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях непосредственно в зоне Приморского течения (Гинзбург и др., 1998; Ладыченко, 2002; Ладыченко, Лобанов, 2013; Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008; Пономарев и др., 2011; Юрасов и др., 2009). Вихревая динамика усиливает водообмен шельфа и глубокого моря, интенсифицируя процессы первичного продуцирования (Звалинский и др., 2006) и оказывая влияние на поведение морских организмов (Жадан и др., 2013).

Сведения о вертикальной структуре вихрей и инициируемых ими процессах перемешивания вод в северо-западной части Японского моря пока еще фрагментарны ввиду ограниченности и нерегулярности контактных измерений в толще вод, которые в этом районе до сих пор выполнялись научно-исследовательскими судами (НИС). Требуемую длительность и регулярность таких исследований способны обеспечить автономные океанологические приборы. Однако, дрейфующие буи PALACE (проект ARGO) оказались недостаточно эффективными для исследования структуры вод в районах континентального склона. Поэтому было логично воспользоваться успешным опытом применения заякоренного автономного профилирующего аппарата (далее профилограф) Аквалог (Островский и др., 2013). Притопленная буйковая станция с профилографом была установлена на континентальном склоне на изобате 440 м в районе к востоку от залива Петра Великого с апреля по октябрь 2015 г. Измерения гидрофизических параметров производились штатным для профилографа модулем SBE 52-MP (Moored Profiler) CTD.

Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог (Островский и др., 2013) позволяет регулярно получать вертикальные профили гидрофизических параметров, включая температуру и соленость воды. При этом решена задача однородности измерений, что применительно к профилированию водной толщи означает выборку заданных параметров с определенной точностью и равномерной дискретностью по вертикали. Регулярно собранные данные позволяют обеспечить статистическое оценивание с высокой точностью, их легче усваивать на этапе специализации в численных моделях динамики океана. В 2010–2016 гг. профилограф Аквалог был использован для научных исследований в Балтийском, Карском, Красном, Мертвом, Средиземном и Черном морях (Островский, 2017). Однако, до сих пор не были детально исследованы особенности применения CTD-зондов в составе профилографов Аквалог, отсутствуют также отлаженные методики обработки соответствующих данных измерений тонкой термохалинной структуры водной толщи.

В настоящей работе выполнены оценки погрешностей полученных данных натуральных измерений термохалинных параметров в Японском море, описана схема первичной обработки, которая позволила уменьшить уровни погрешностей. Повышению качества гидрофизических данных профилографа также способствовала их верификация по результатам судовых СТД-зондирований. Полученный таким образом уникальный массив натуральных данных позволил выявить многочисленные неоднородности морской среды с масштабами от нескольких дней до нескольких недель. Вертикальная структура синоптического вихря, прошедшего в районе заякоренной станции в конце мая 2015 г., была проанализирована по фрагменту этого массива с использованием данных спутниковых наблюдений в ИК-диапазоне электромагнитного спектра.

1. Данные и методы

Профилограф Аквалог представляет собой подвижную платформу, снабженную океанологическими датчиками, которая устанавливается на заякоренной станции для вертикального зондирования морской среды (Островский и др., 2013). Он автоматически перемещается по тросу, натянутому вертикально между подповерхностной плавучестью и донным якорем, обеспечивая периодические измерения в толще вод в течение длительного времени.

Заякоренная автономная станция Аквалог была установлена в районе континентального склона Приморья в точке с координатами: 42.53° с.ш., 133.80° в.д, где глубина места достигала 440 м (рис. 1а). Профилирование водного слоя производилось каждые 6 часов с 18 апреля по 15 октября 2015 г. в двух режимах: в течение пяти суток между горизонтами 65 и примерно 300 м, а на следующие, шестые сутки до глубины 420 м.

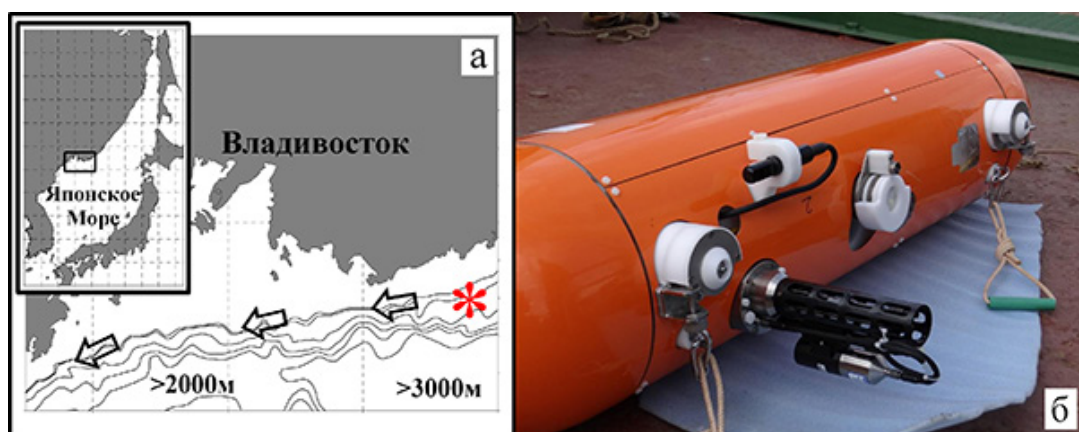


Рис. 1. Рельеф дна в районе исследования (а), изобаты 100, 200, 500, 1000, 2000 и 3000 м; стрелками обозначено Приморское течение, звездочкой – место постановки заякоренной автономной станции. На врезке – Японское море, прямоугольником выделен район исследования. Профилограф Аквалог со встроенным модулем SBE 52-MP CTD (б) на палубе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» перед установкой в Японском море в апреле 2015 г.

Температура морской воды, её электропроводность, содержание растворённого в воде кислорода и давление измерялись с частотой 1 Гц модулем SBE 52-MP CTD (далее СТД-зонд, рис. 1б), который специально предназначен для измерений с подвижных платформ. Его чувствительные элементы: ячейка проводимости SBE 4 и датчик кислорода SBE 43F соединены с помпой SBE 5 (канал прокачки), а термометр SBE 3 установлен вне этого канала, рядом с входным отверстием SBE 4 (<http://www.seabird.com>). Модуль SBE 52-MP CTD располагался горизонтально внутри корпуса верхней части профилографа Аквалог, за исключением входного отверстия SBE 4 и термометра SBE 3, которые выступали за пределы этого корпуса.

Профилограф Аквалог удерживался на максимальной глубине в начале и по завершению каждого цикла движения. Регистрация данных осуществлялась на всех этапах движения носителя, т.е. при его перемещениях, как вверх, так и вниз. Скорость профилирования в обоих направлениях составляла около 0.2 м/с.

2. Погрешности и первичная обработка СТД данных

Данные, измеренные модулем SBE 52-MP CTD, получены в условиях натурального эксперимента и содержат погрешности: инструментальные и методические. Первые зависят от метрологических характеристик используемых датчиков и стратификации исследуемой водной толщи, а вторые – от условий проведения натурального эксперимента. Кроме того, инструментальные погрешности принято разделять на три компонента: систематические, случайные и динамические (Архипкин и др., 2009).

Корректный анализ измеренных данных требует оценки и учёта возможных уровней погрешностей, а также предварительной, первичной обработки исходных массивов данных, позволяющей понизить вклад погрешностей до минимального уровня (UNESCO, 1988).

Модуль SBE 52-MP CTD, входящий в состав профилографа, был произведён в сентябре 2014 г. и калибровки его датчиков соответствуют указанному сроку. До момента постановки станции этот модуль не эксплуатировался. Фирма-изготовитель Sea-Bird Electronics Inc. (США) гарантирует измерение параметров морской воды согласно характеристикам SBE 52-MP CTD, указанным в Таблице 1 (<http://www.seabird.com>). Величины этих характеристик определены на лабораторных стендах, т.е. соответствуют идеальным условиям (Архипкин и др., 2009).

Таблица 1. Основные характеристики SBE 52-MP CTD

Метрологические характеристики	Электропроводность, мСм·см ⁻¹	Температура, °С	Давление, дбар	Кислород, мкмоль/кг
Сенсор	SBE 4	SBE 3		SBE 43F
Диапазон	0 ÷ 90	-5 ÷ +35	до 1000	до 460
Точность	0.003	0.002	1	7
Дрейф/месяц	0.003	0.0002	0.05	1.6
Разрешение	0.0005	0.0001	0.02	0.15

Предварительный анализ массива СТД данных зонда SBE 52-MP показал узкие диапазоны изменчивости измеренных параметров водной среды: $65 \div 430$ дбар, $5.5 \div 0.7^\circ\text{C}$, $32.5 \div 29.1$ мСм/см и $430 \div 260$ мкмоль/кг. Следовательно, учитывая узость диапазонов и заявленные границы метрологических характеристик (точность и дрейф), оцениваем систематическую компоненту инструментальной погрешности измеренных значений температуры пределами $\pm 0.003^\circ\text{C}$, электропроводности ± 0.010 мСм/см, давления ± 2 дбар и растворённого кислорода ± 10 мкмоль/кг.

Приборы фирмы SBE отличаются минимальными уровнями шума измерительных каналов (Архипкин и др., 2009). Оценки уровня случайных компонент инструментальных погрешностей для аналогичных профилирующих комплексов, как правило, не превышают 3-х величин параметра «разрешение» (Лазарюк, 2009), т.е. соответствуют: 0.0005°C , 0.001 мСм/см, 0.05 дбар и 0.4 мкмоль/кг.

Наибольший разброс в оценках уровней инструментальных погрешностей измеренных величин электропроводности C_m , температуры T_m и растворённого в воде кислорода O_m , приходится на динамические компоненты, которые зависят от стратификации слоя морской воды, инерционности соответствующего датчика и режима движения измерительного комплекса (Лазарюк, 2009).

Влияние инерционных эффектов на измеренную величину $X_m(t)$ обобщённого параметра $X_r(t)$ в момент времени t при наличии стратификации ($X_r(t) \neq \text{const}$) в исследуемом слое морской воды и в отсутствии систематических и случайных погрешностей принято описывать дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$X_r(t) = X_m(t) + R_x(t) \cdot X_m'(t), \quad (1)$$

где $X_m'(t)$ – производная. Величину коэффициента $R_x(t)$ определяют конструкция датчика, свойства материала его чувствительного элемента и характеристики омывающего потока морской воды.

Инерционность ячейки SBE 4, трёхэлектродной капиллярной трубки длиной 19 см, сопряжённой с насосом SBE 5, оценивается константой $R_c(t) \approx 0.06$ с. Инерционность стандартного термометра SBE 3, как правило, не превышает $R_r(t) \leq 0.5$ с. А величина инерционного коэффициента кислородного датчика SBE 43F, который располагался непосредственно между ячейкой и насосом, варьирует как $2 \leq R_o(t) \leq 5$ с в зависимости от температуры окружающей среды (<http://www.seabird.com>). Однако данные ячейки, измеренные в стратифицированных по температуре слоях, могут содержать дополнительную погрешность, вызванную тепловым контактом корпуса SBE 4 (массивной стеклянной трубки) с измеряемой порцией морской воды (эффект именуемый Cell Thermal Mass, <http://www.seabird.com>).

Решение задачи Коши уравнения (1) при условии $X_r(0) = X_m(0)$ в начальный момент времени $t = 0$ и постоянстве скорости перемещения зонда, $V(t) = \text{const}$, имеет вид:

$$X_m(t) = X_m(t-\delta t) \cdot \exp[-\delta t/R_x] + X_r(t) \cdot \{1 - \exp[-\delta t/R_x]\}, \quad (2)$$

где δt – интервал регистрации данных. Согласно выражению (2) процесс измерения подобен экспоненциальной фильтрации, т.е. исходное распределение $X_r(t)$ подвергается сглаживанию с характерным смещением его локальных неоднородностей на величину, приблизительно, равную инерционному коэффициенту R_x (Архипкин и др., 2009).

Непосредственно в структурах профилей измеренных параметров практически не заметны изменения, обусловленные динамическими погрешностями. Однако, из-за неравенства инерционных коэффициентов $R_r(t) > R_c(t)$, при расчёте профилей солёности $S_m(t)$ и плотности $\rho_m(t)$ по температуре $T_m(t)$ и электропроводности $C_m(t)$ в слоях температурного градиента возникают ложные аномалии (Лазарюк, 2009).

Для понижения уровней погрешностей, а также устранения иных эффектов, ухудшающих качество полученной информации, фирма SBE рекомендует выполнять первичную обработку данных программой SBE-Data Processing (<http://www.seabird.com>). В частности, процедурой Filter уменьшается динамическая рассогласованность между измеренными величинами температуры и электропроводности. Её алгоритм соответствует схеме экспоненциального фильтра (2) и применяется, преимущественно, для сглаживания профиля электропроводности, измеренного с меньшей инерционностью:

$$C_s(t) = C_s(t-\delta t) \cdot \exp[-\delta t/R_s] + C_m(t) \cdot \{1 - \exp[-\delta t/R_s]\}. \quad (3)$$

Величину параметра R_s предлагается устанавливать экспертным методом.

Дополнительные погрешности данных ячейки SBE 4, вызванные эффектом Cell Thermal Mass, минимизируются с помощью одноимённой процедуры, которая при размерности измеренной электропроводности (мСм/см) соответствует схеме:

$$C_{sc}(t) = C_s(t) + A_c(t) \cdot 10, \quad (4)$$

$$A_c(t) = a_1 \cdot [T_m(t) - T_m(t-\delta t)] \cdot \{1 + 0.006 \cdot [T_m(t) - 20]\} / 10 - b_1 \cdot A_c(t-\delta t), \quad (5)$$

$$a_1 = 2a / [b + 2], \quad (6)$$

$$b_1 = 1 - 2a_1 / a. \quad (7)$$

Значения коэффициентов $\{a; b\}$ в выражениях (6, 7) индивидуальны для каждой модели фирмы SBE. Например, для зондов серии SBE 19plus рекомендовано использовать $\{0.04; 1/8\}$. Однако их величины для ячейки SBE 4 отсутствуют в описании модуля SBE 52-MP CTD.

Инерционный эффект в данных датчика SBE 43F проявляется смещением локальных неоднородностей на профилях $O_m(t)$ относительно исходного распределения $O_r(t)$:

$$O_r(t) \approx O_m(t + Dt), \quad (8)$$

и устраняется процедурой Aling. Величину параметра смещения $Dt \approx n \cdot \delta t$, где $n = 0, 1, \dots$, предлагается оценить с точностью $\pm \delta t$ из анализа данных, измеренных на спуске и при подъёме прибора (<http://www.seabird.com>).

Принимая во внимание эти соображения, мы отказались от программы SBE-Data Processing и воспользовались разработанным в ТОИ ДВО РАН программным продуктом CTDdata_cor (Лазарюк, 2010), который мы адаптировали для массива исходных данных SBE 52-MP CTD (программа CTDdata_cor_SBE_52-MP). Таким образом, в процессе первичной обработки каждой пары $\{C_m(t); T_m(t)\}$ величина параметра R_s фильтра (3) подбиралась в пределах от 0 до 2 по критерию минимума абсолютного значения суммы отрицательных величин производной по глубине потенциальной плотности $\rho_\theta(z) = \rho(S, \theta, P)$. Коэффициенты $\{a; b\}$ (6, 7) определялись методом наименьших квадратов при сопоставлении парных профилей солёности, рассчитанных на спуске и при подъёме профилографа. Аналогичным методом устанавливался параметр смещения Dt (8) при коррекции распределения растворённого в воде кислорода $O_m(t)$. На завершающем этапе обработки устранялся шум в структурах рассчитанной солёности $S(t)$ и формировались ряды откорректированных данных с заданным шагом по глубине. Расчётные характеристики водной среды: солёность, плотность, потенциальная температура и глубина, - определялась по общепринятым формулам (Fofonoff, Millard, 1983).

3. Результаты первичной обработки данных STD-зонда SBE 52-MP

Исходный массив данных SBE 52-M CTD, полученный с частотой 1 Гц при подъёме и спуске профилографа Аквалог с 18 апреля по 15 октября 2015 г., содержит 718 парных серий зондирований между горизонтами 65 и 300 (420) м и, дополнительно, 117 одиночных, выполненных на подъёме и охватывающих слой 420-300 м.

Первичная обработка данных программой CTDdata_cor_SBE_52-MP показала, что устранение рассогласованности измеренных профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$ с использованием экспоненциального фильтра (3) в 90% случаев не привело к заметному изменению уровня динамической погрешности рассчитанной солёности $S_s(t)$. Оптимальные величины параметра R_s , установленные с шагом 0.05 с, варьировали в пределах от 0.2 до 0.5 с (рис. 2). Это обусловлено отсутствием в данных градиентных прослоек со значительными перепадами температуры, поскольку в течение

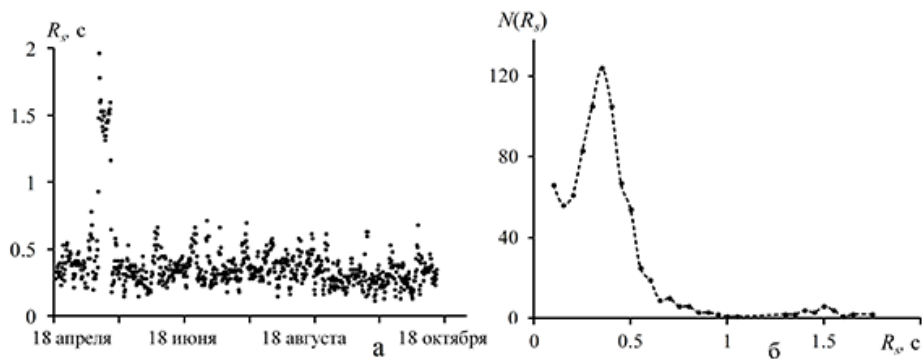


Рис. 2. (а) – оптимальные величины параметра $R_s(n)$, полученные в процессе коррекции экспоненциальным фильтром (3) профилей электропроводности, измеренных SBE 52-MP STD на траекториях подъёма профилографа Аквалог с 18 апреля по 15 октября 2015 г.; (б) – повторяемость N параметра экспоненциальной коррекции $R_s(n)$.

периода наблюдений слой сезонного термоклина располагался выше 60 м, а также наличием методических погрешностей, вызванных турбулентными перемещениями порций морской воды в пограничном слое корпуса профилографа Аквалог. Тем не менее, в 10% случаев динамические погрешности в данных $S_s(t)$ удалось заметно понизить. Эти случаи, в основном, соответствуют периоду с 6 по 11 мая 2015 г., когда по неустановленной причине измерения температуры происходили с увеличенной инерционностью, и согласование профилей $T_m(t)$ и $C_m(t)$ было выполнено при значениях коэффициента $0.8 \leq R_s \leq 2$ с (рис. 2а).

Погрешности данных ячейки проводимости, обусловленные эффектом Cell Thermal Mass, устранялись по схеме (4-7). При величинах коэффициентов $\{a; b\} = \{0.10; 1/13\}$ удалось достичь приемлемого уровня среднеквадратичной оценки разности значений солёности, полученных на спуске и подъёме, $D|S_{up}(t) - S_{down}(t)| < 0.001$ епс (единица практической солёности).

На рис. 3 представлены данные SBE 52-MP CTD от 20 апреля 2015 г. Профили температуры, измеренные на подъёме и спуске, имеют минимальные отличия (рис. 3а). В то же время, на профилях солёности (рис. 3б), рассчитанных до коррекции профилей электропроводности, имеются значительные расхождения ($|S_{up}(t) - S_{down}(t)| \leq 0.03$ епс) в слоях, характеризующихся температурными градиентами. В результате последующей коррекции данных программой CTDdata_cor_SBE_52-MP эти расхождения уменьшены в несколько раз (рис. 3в).

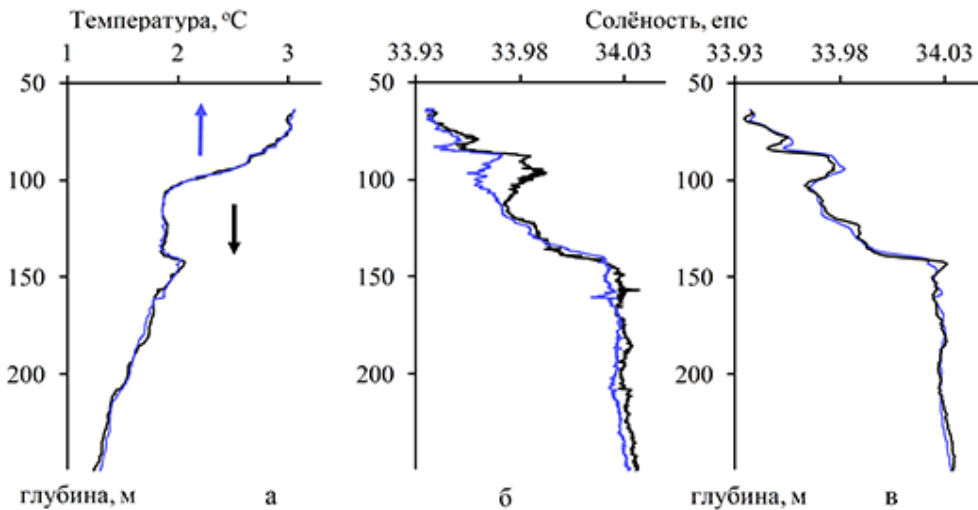


Рис. 3. Профили температуры (а) и солёности (б, в) исследуемой водной массы по данным измерений SBE 52-MP CTD на спуске и подъёме профилографа в 18:00-18:50 20 апреля 2015 г., причем на рисунках (б) и (в) показаны профили солёности, рассчитанные соответственно до и после первичной обработки данных.

В большинстве случаев проявления инерционного эффекта в данных датчика кислорода SBE 43F удавалось ослабить процедурой смещения (8) профиля $O_m(t)$ при $Dt=2$ сек. Высокочастотные вариации на профилях рассчитанной солёности $S(t)$ устранялись прямоугольным фильтром при ширине окна 7 сек (1.3–1.4 м). Формирование массива откорректированных данных осуществлялось с шагом по глубине 1 м.

4. Верификация гидрологических данных профилографа Аквалог

Судовые измерения были использованы для верификации данных профилографа Аквалог. Океанологический разрез, пересекающий место установки профилографа Аквалог, был выполнен 30 мая 2015 г. с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс № 69). Гидрологические измерения производились зондирующим комплексом SBE-911plus, подводный блок которого состоял из зонда SBE 9plus, пробоотборника SBE 32 и батометров Нискина объёмом 5 литров. SBE 9plus включал: встроенный в корпус зонда датчик давления типа Digiquartz с температурной компенсацией, два комплекта датчиков для измерения температуры SBE 3plus и электропроводности SBE 4C, снабжённых помпами SBE 5T, и оптический датчик кислорода Rinko III (JFE Advantech Co., Ltd., Япония). Измеряемые параметры регистрировались бортовым блоком SBE-11plus с частотой 24 Гц, средняя скорость зондирования не превышала 1 м/с.

Оба комплекта SBE 3plus + SBE 4C зонда SBE-9plus имели калибровочные сертификаты, датированные августом 2014 г. Дополнительно их показания были откорректированы по результатам специального эксперимента с более «свежим» (январь 2015 г.) аналогичным комплектом Сеульского университета (Республика Корея). Интеркалибровка комплектов (одновременное их использование при зондированиях SBE-9plus) была выполнена в предыдущем международном этапе экспедиции на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (апрель 2015 г.). Расхождения между показаниями датчиков температуры SBE 3plus трёх комплектов, задействованных в эксперименте, не превышали 0.001°C, т.е. находились в пределах заявленной точности. Сравнение данных ячеек проводимости показало минимальный разброс (менее 0.0005 мСм/см) между комплектом Сеульского университета и SBE 4C одного из двух комплектов ТОИ ДВО РАН. В дальнейшем, именно данные этого комплекта использовались на этапах первичной обработки и верификации данных SBE 52-MP CTD.

Показания датчика кислорода Rinko III также были предварительно откорректированы по результатам их сравнения с данными лабораторного определения концентраций кислорода (метод Винклера) в пробах воды, отобранных с помощью пробоотборника SBE 32. После коррекции данных Rinko III их расхождения с величинами, установленными методом Винклера, не превышали ± 3 мкмоль/кг.

Сопоставление данных SBE-911plus, измеренных на станциях, ближайших к месту постановки профилографа Аквалог, и собственно SBE 52-MP CTD показало различие между данными температуры менее 0.002°C и солёности не более 0.007 епс (рис. 4), что соответствует ранее установленной оценке заявленной точности датчиков SBE 52-MP CTD, с учётом его работы в течение полутора месяцев. В то же время, профили растворенного в воде кислорода показали систематическое отклонение, около 20 мкмоль/кг, которое в три раза хуже номинальной точности SBE 43F.

Выявленные поправки использовались для коррекции данных SBE 52-MP CTD, а именно, значений солёности и концентрации растворенного в воде кислорода.

Таким образом, принимая во внимание результаты первичной обработки исходных данных SBE 52-MP CTD, а также последующую их верификации по

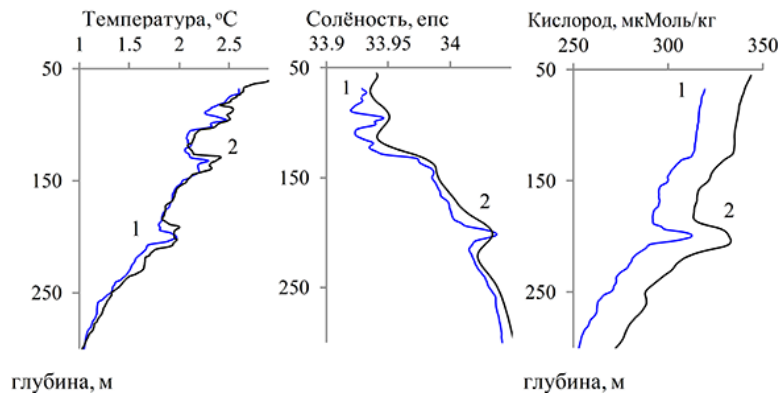


Рис. 4. Вертикальные профили температуры, солёности и содержания растворенного в воде кислорода, измеренные 30 мая 2015 г. профилографом Аквалог (1) и на ближайшей станции с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2).

данным судовых зондирований SBE-911plus, погрешности полученного массива гидрологической информации оцениваются пределами: по температуре не более $\pm 0.002^\circ\text{C}$, электропроводности – ± 0.003 мСм/см, давлению – ± 2 дбар и содержанию растворённого в воде кислорода менее ± 10 мкмоль/кг.

Временные вариации температуры, солёности и аномалий плотности в слое 65–300 м по данным профилографа Аквалог (рис. 5) отражают разномасштабность динамических процессов на континентальном склоне Японского моря в течение периода наблюдений. При этом наибольшие амплитуды вариаций термохалинных

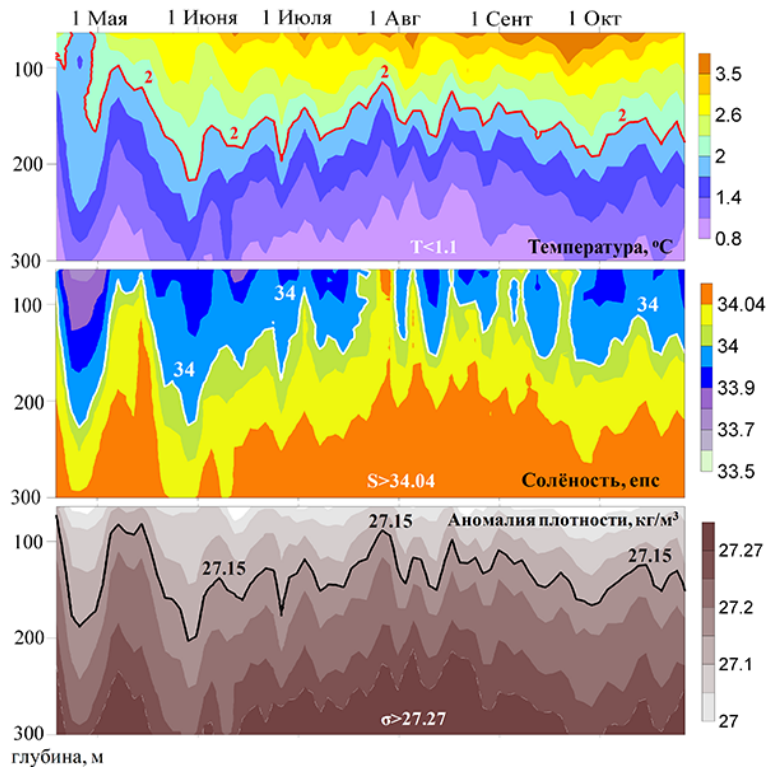


Рис. 5. Температура, солёность и аномалия плотности, измеренные с помощью профилографа Аквалог в слое 65–300 м на континентальном склоне Японского моря с 18 апреля по 15 октября 2015 г.

параметров приходится на апрель-май 2015 г., что свидетельствует о большей интенсивности термодинамических процессов в весенний сезон, чем в последующий летне-осенний период 2015 г.

5. Анализ вертикальной структуры синоптического вихря

Крупномасштабные изменения в вертикальном распределении гидрофизических характеристик, зафиксированные профилографом Аквалог с 21 мая по 3 июня 2015 г. (рис. 5), характерны для антициклонического вихря. Момент формирования этого вихря в зоне Приморского течения и его структурные проявления в поле поверхностной температуры исследуемого района удалось проследить по серии ИК изображений радиометром высокого разрешения (AVHRR) ИСЗ NOAA. Изображения температуры поверхности Японского моря (ТПМ) были получены из архива Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (<http://satellite.dvo.ru>). На рис. 6 представлен снимок AVHRR от 30 мая, соответствующий дате выполнения океанологического разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

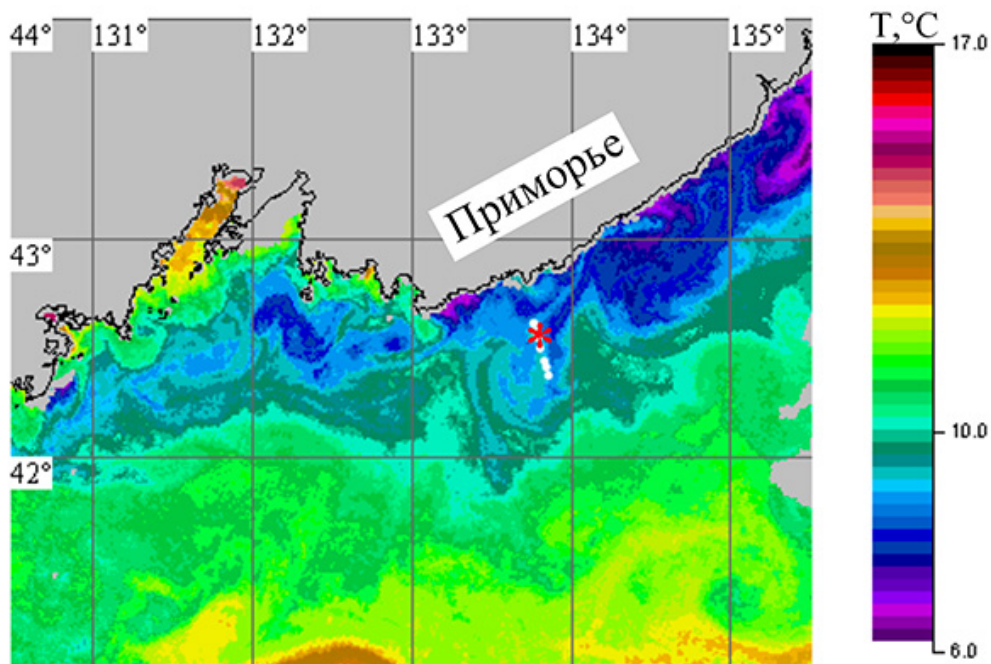


Рис. 6. Температура поверхности северо-западной части Японского моря 30 мая 2015 г. (данные радиометра AVHRR ИСЗ NOAA). Точками показаны станции судового разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев», звездочкой – место установки профилографа Аквалог.

К сожалению, ввиду значительного облачного покрова 23–29 мая над исследуемой частью Японского моря не представляется возможным проследить изменения в поле ТПМ с даты формирования этого вихря (22 мая) и до его прохода над районом постановки профилографа Аквалог. Размеры вихря, уверенно наблюдавшегося в поле температуры поверхности моря с 30 мая по 8 июня, составляли 60–

80 км, он перемещался с Приморским течением в юго-западном направлении вдоль континентального склона от 42.45° с.ш., 133.75° в.д. до 42.28° с.ш., 133.32° в.д. В центре вихря находились более холодные воды, поступившие с северо-востока из прибрежной области, которые переносились по его восточной периферии в сторону открытого моря, а теплая вода перемещалась из открытой части моря в сторону берега по западной периферии вихря.

Фрагмент данных SBE 52-MP CTD (рис. 7) детализирует особенности прохождения вихря через район постановки профилографа. В период с 21 по 26 мая на глубинах 30–70 м имеют место прогибы изотерм 1.4–2.4°C, изогалин 33.94–34.02 епс и изопикн 27.1–27.2 кг/м³, которые, по-видимому, вызваны поступлением 26–27 мая в район установки профилографа относительно легких, теплых и распресненных вод. Центр же вихря прошел южнее. 27–28 мая на глубинах 65–70 м находились более холодные и менее соленые воды (в сравнении с предыдущим и последующим периодами наблюдений), которые имели температуру менее 2.6°C и соленость менее 33.9 епс. Их наличие, по-видимому, связано с выносом вод Приморского течения по восточной периферии вихря. Тыловая зона вихря прошла через район станции Аквалог 28–31 мая, что привело к изменениям температуры, солености и плотности воды (рис. 7). Эти аномалии, возможно, свидетельствуют об усилении процессов перемешивания в диапазоне глубин измерений.

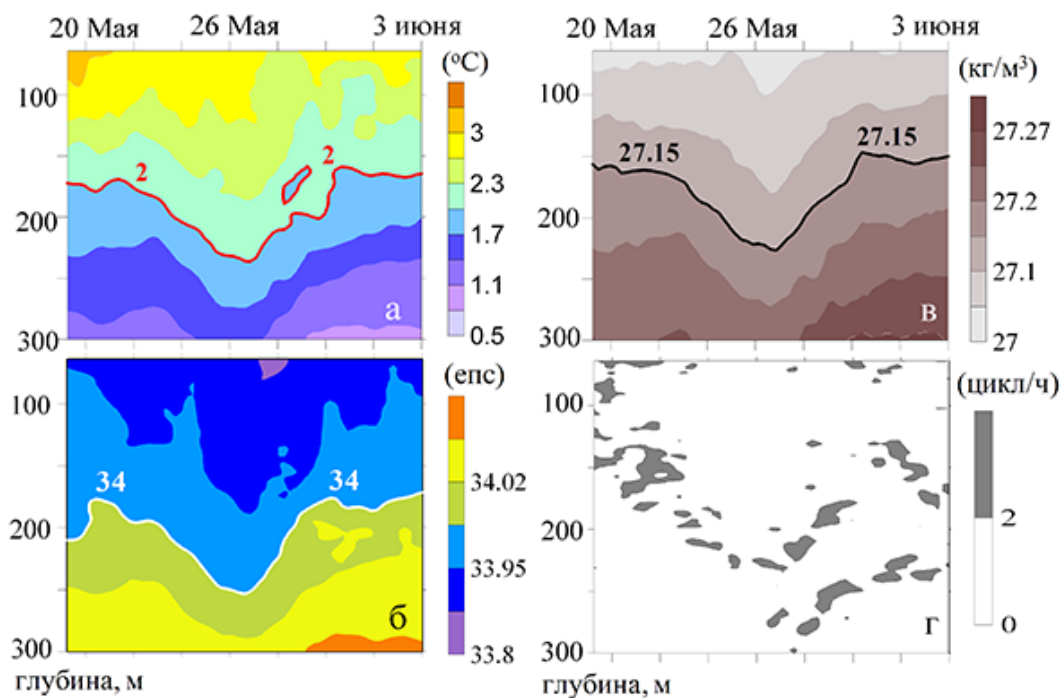


Рис. 7. Температура (а), соленость (б), аномалия плотности (в) и частота Брента-Вяйсяля (г) в осях «время – глубина» по данным зонда SBE 52-MP CTD профилографа Аквалог в период с 20 мая по 3 июня 2015 г.

Принимая во внимание изменения (в осях «время – глубина» по данным профилографа Аквалог) положения изоповерхностей и локальных максимумов частоты Брента-Вяйсяля:

$$N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho_{\theta}} \frac{d\rho_{\theta}}{dz}}, \quad (9)$$

характеризующей вертикальное распределение потенциальной плотности $\rho_{\theta}(z)$, можно оценить время прохождения вихря над местом его установки как $T \approx 10$ – 11 сут. (рис. 7). По спутниковым данным диаметр этого вихря не превышает $d \approx 60$ – 80 км (см. выше). Соответственно скорость его перемещения, $V = d/T$, при разных комбинациях параметров варьирует от 6 до 9 см/с, составляя в среднем 7.7 см/с. В работе (Ладыченко, Лобанов, 2013) скорости перемещения вихрей в заливе Петра Великого и над склоном к югу от него оценивались как 3–6 см/с. Следует, однако, иметь в виду, что вихри в заливе Петра Великого были относительно невелики, их наиболее повторяемые размеры составляли от 20 до 60 км. Представляется вполне возможным, что рассматриваемый в данной работе более крупный вихрь, связанный с Приморским течением, двигался быстрее.

Так же следует отметить, что субарктическая структура вод, свойственная району исследования, характеризуется тонким пикноклином и малым бароклинным радиусом деформации Россби, который в теплый период года не превышает 7–10 км (Park et al., 2007), и формирование синоптических вихрей размером до 80 км (при ширине шельфа не более 25 км), свидетельствует о наличии значительной баротропной составляющей.

К 30 мая вихрь переместился на юго-запад, поэтому место установки профилографа Аквалог и разрез, выполненный НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в этот день, оказались восточнее центра вихря, но западнее зоны адвекции холодных вод в сторону открытого моря (см. рис. 6). Тем не менее, данные судового зондирования SBE-911plus на станции разреза, расположенной на широте 42.5° с.ш. показали подъем изотерм 2.25 – 2.75°C на 10–15 м и опускание изотерм 1.25 – 1.75°C на 40–50 м, т.е. наличие линзообразной структуры (рис. 8). Линзообразную структуру в этом районе демонстрируют и судовые данные измерений солености. В районе к югу от 42.45° с.ш. наблюдался подъем изотерм 1 – 2°C и изогалин 33.98–34.05 епс в сторону открытого моря (рис. 8).

Прохождение вихря в районе станции Аквалог сопровождалось изменением вертикальной стратификации. Наибольшие вертикальные градиенты плотности к моменту подхода вихря, 20–21 мая, в единицах частоты Брента-Вяйсяля (9) не превышали 2–2.5 цикл/час и располагались на горизонтах 150–170 м (см. рис. 7). При прохождении ядра вихря 26–27 мая эти экстремумы опустились на глубину 220–250 м, а выше находились воды с пониженной стратификацией (1–1.5 цикл/час). 28–29 мая в тылу вихря наблюдалось расщепление пикноклина: между слоями градиентов 2–2.5 цикл/час, расположенных на горизонтах 200 и 240 м, находился промежуточный квазиоднородный слой (градиенты плотности менее 1.5 цикл/час), что говорит о наличии интрузии. Следует отметить, что слой скачка (сезонный пикноклин) находился на глубине около 50 м, что видно на станциях разреза (см. рис. 8), т.е. выше диапазона профилирования Аквалога (см. рис. 7).

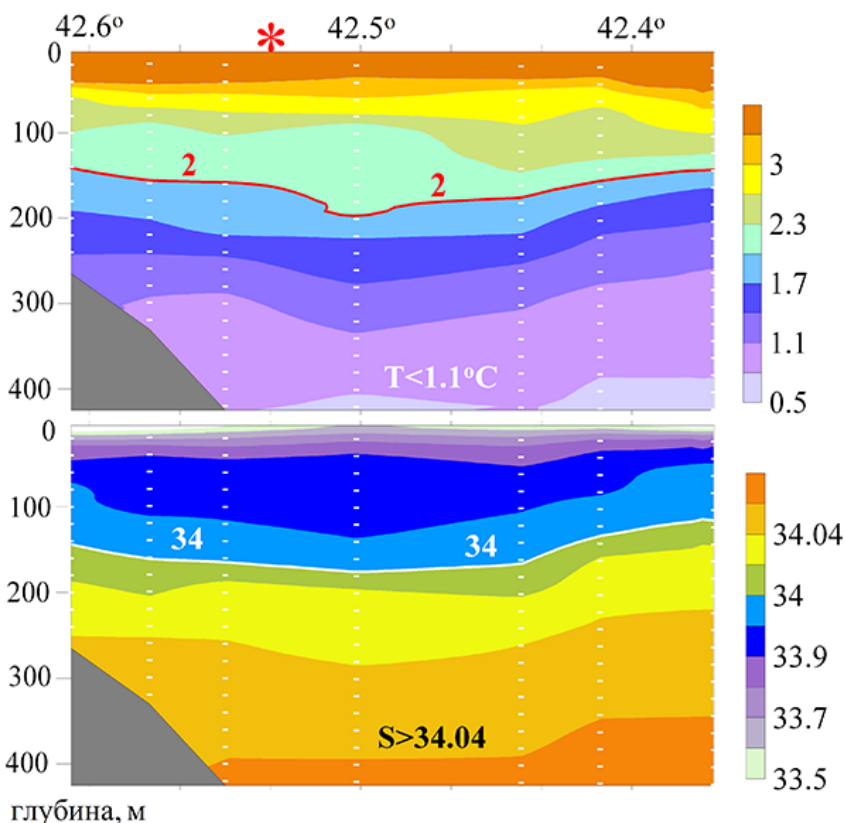


Рис. 8. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности (епс) на океанологическом разрезе, выполненном НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 30 мая 2015 г. (см. положение станций разреза на рис. 6) в осях «широта – глубина». Вертикальные линии показывают положение станций зондирования, звёздочка – место установки профилографа Аквалог.

Сравнение вертикальных профилей температуры и солёности, измеренных с борта судна и профилографом Аквалог (см. рис. 4), выявило несоответствие их локальных экстремумов на горизонтах выше 150 м, что свидетельствует о пространственной неоднородности подповерхностных вод, захваченных вихрем, и о наличии мелкомасштабных динамических процессов. Данные также показали инверсионный слой, который располагался на больших глубинах с центром на горизонте 200 м и имел локальные аномалии температуры около 0.2°C и солёности около 0.03 епс. Его наличие, по-видимому, обусловлено проникновением в исследуемую зону теплых и более солёных вод с внешней периферии вихря. Подобные особенности не выявлены на профилях температуры и солёности, измеренных на станциях, расположенных ближе к берегу.

6. Заключение

С помощью профилографа Аквалог в составе заякоренной станции, установленной на континентальном склоне в северо-западной части Японского моря в период с апреля по октябрь 2015 г., были проведены уникальные экспериментальные ис-

следования термохалинной структуры вод северо-западной части Японского моря. Массив данных содержит более 700 парных профилей основных гидрологических параметров, полученных регулярно с дискретностью 4 раза в сутки с частотой 1 Гц на подъеме и спуске профилографа в слое 65–300 (420) м с помощью модуля SBE 52-MP CTD, который был установлен на профилографе. Анализ погрешностей STD данных, выполненный в процессе их первичной обработки, выявил, в том числе и нехарактерные проявления инерционных эффектов. В частности, серия профилей температуры воды показала кратковременный (в течение шести суток) рост в 2-4 раза инерционности термометра, причина которого не установлена.

Первичная обработка массива исходных данных зонда SBE 52-MP CTD, выполненная специально разработанной программой CTDdata_cor_SBE_52-MP, в которой алгоритмы стандартных процедур программы SBE-Data Processing дополнены количественными критериями, позволила минимизировать вклады динамических и случайных погрешностей при определении величин гидрологических параметров. Верификация измерений SBE 52-MP CTD по данным зондирований SBE-911plus, выполненных 30 мая с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев», позволила устранить также и систематические компоненты погрешностей. В результате, качественные показатели гидрофизической информации, полученной профилографом Аквалог, удалось привести к стандартам WOCE, а именно, по температуре до $\pm 0.002^\circ\text{C}$, по электропроводности до ± 0.003 мСм/см, по давлению до ± 2 дбар.

Анализ вариаций температуры, солёности и аномалии плотности, выполненный по массиву обработанных данных профилографа Аквалог, продемонстрировал разномасштабность термодинамических процессов в исследуемом районе Японского моря. В частности, в период с 21 мая по 3 июня профилограф зарегистрировал термохалинную структуру, характерную для антициклонического вихря. Детализация некоторых пространственно-временных характеристик этого вихря стала возможной после привлечения спутниковых данных ИСЗ NOAA и гидрологических станций разреза, выполненных с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

В целом, применение профилографа Аквалог в составе заякоренной станции, установленной на континентальном склоне северо-западной части Японского моря, в сочетании с судовыми разрезами и спутниковыми съемками весьма перспективно для развития 4-х мерной океанографии.

Авторы выражают признательность капитану и команде НИС Академик М.А. Лаврентьев за помощь при выполнении работ в рейсе № 69, а также А.Ф.Сергееву, А.А. Воронину, И.А.Горину и П.Ю.Семкину за работы по подъему станции в октябре 2015 г.

Результаты исследований, представленные во Введении и в разделах 1 и 7, получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010). Результаты исследований, представленные в разделах 2, 3, 4 и 6, получены за счет средств РФФИ (проект №16-05-00899). Результаты исследований, представленные в разделе 5, получены за счет средств РФФИ (проект №16-55-50071-яф-а). Результаты исследований, представленные в разделе 6, получены за счет средств гранта 15-I-1-047 программы приоритетных исследований ДВО РАН Дальний Восток.

Литература

- Архипкин В.С., Лазарюк А.Ю., Левашов Д.Е., Рамазин А.Н. Океанология // Инструментальные методы измерения основных параметров морской воды: Учебное пособие. М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. 335 с.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буйев) // Исследование Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
- Жадан П.М., Ващенко М.А., Лобанов В.Б., Котова С.А. Исследование влияния факторов среды на нерест морского ежа *Strongylocentrotus intermedius* // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 170–179.
- Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология. 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.
- Ладыченко С. Ю. Изменение термической структуры поверхностных вод у побережья Приморья в осенний период 2000 г. // Океанологические исследования: сб. статей по мат. конф. молодых ученых ТОИ ДВО РАН (27–30 ноября 2001 г.). Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 75–83.
- Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3–15.
- Лазарюк А.Ю. Динамическая коррекция STD-данных // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 59–71.
- Лазарюк А.Ю. Коррекция динамической погрешности данных глубоководных гидрологических наблюдений с помощью STD-зондов (STDdata_cor): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617298. Правообладатель: ТОИ ДВО РАН. Зарегистрировано в реестре 1 ноября 2010 г.
- Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря. Том 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 2–57.
- Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- Островский А.Г. Заякоренные мобильные профилирующие аппараты // Освоение глубин океана. Ред. Б.А. Нерсесов. М.: Оружие и технологии, 2017 (в печати).
- Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 100–104.
- Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Никитин А.А. Характеристики фронтов в Японском море по данным судовых и спутниковых измерений // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 93–105.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
- Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., K. Kim, M. Takematsu, and J.-H. Yoon. A history of physical oceanography research in the Japan/East Sea // Oceanogr. 2006. Vol. 19. No. 3. P. 18–31.

А.Ю. Лазарюк и др.

- Fofonoff N.P., Millard R.S.* Algorithms for computation of fundamental properties of sea water // UNESCO Technical Papers in Marine Science. 1983. Vol. 44. 53 p.
- Operator's manual. SBE Data Processing 7.23.2. <http://www.seabird.com>.
- SBE 52-MP Moored Profiler CTD & (optional) Dissolved Oxygen Sensor. <http://www.seabird.com>.
- Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.Y., Kim K.-R.* Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea // Deep Sea Research. I. 2007. Vol. 54, No. 4. P. 453–470.
- The acquisition, calibration, and analysis of CTD data. // UNESCO technical papers in marine science. 1988. Vol. 54. 94 p.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMOHALINE STRUCTURE AT THE CONTINENTAL SLOPE IN THE NORTH-WESTERN JAPAN SEA

**A.Yu. Lazaryuk¹, D.D. Kaplunenko¹, A.G. Ostrovskii², V.B. Lobanov¹,
O.O. Trusenkova¹, S.Yu. Ladychenko¹**

¹*V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, Russia, 690041
e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nahimovskiy prospekt, Moscow, Russia, 117997 e-mail: osasha@ocean.ru*

Submitted 10.10.2017, accepted 25.12.2017

The pioneering long-term survey of the NW Japan Sea thermohaline structure was implemented for almost half a year from April 18, 2015 through October 15, 2015. The measurements were carried out by using the SBE 52-MP CTD probe at the moored profiler Aqualog. The profiler mooring was deployed at the continental slope in the area east of Peter the Great Bay. A novel approach to the primary processing of the profiler CTD data is discussed. It features a new data processing software CTDdata_cor_SBE_52-MP. The profiler data is verified based on ship measurements at a cross-slope transect on May 30, 2015. The processing and verification of the SBE 52-MP CTD observations allows for the data quality improvement up to the WOCE standards. The profiler mooring data and the ship measurements reveal variations in the ocean temperature, salinity, and density stratification due to ocean eddy passage nearby the mooring site. The NOAA/AVHRR infrared satellite imagery is used for detection and analysis of this eddy and its movement southwestward along the Primorye Current zone. Overall, the study demonstrates a powerful potential of combined analysis of long-term time series of the in situ data at fixed geographical location, the ship borne oceanographic section, and the multispectral satellite information in compliance with the 4D oceanography requirements.

Keywords: CTD data analysis, moored profiler, infrared satellite imagery, ocean thermohaline structure, mesoscale eddy, the Japan Sea, the Primorye Current, 4D oceanography.

References

- Arkhipkin V.S., Lazaryuk A.Yu., Levashov D.E., Ramazin A.N., Okeanologiya, Instrumental'nye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoi vody (Oceanology. Instrumental methods for measuring the main parameters of sea water), Moskva: Izd-vo MAKS Press, 2009, 335 p.
- Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., K. Kim, M. Takematsu and J.-H. Yoon. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea, *Oceanography*, 2006, Vol. 19, No. 3, pp. 18–31.
- Fofonoff N.P., Millard R.S. Algorithms for computation of fundamental properties of sea water, *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 1983, Vol. 44, 53 p.
- Ginzburg A.I., Kostyanoi A.G., Ostrovskii A.G., Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreifuyushchikh buev) (Surface circulation of the Sea of Japan (satellite information and drifting buoy data)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 1, pp. 66–83.
- Ladychenko S. Yu., Izmenenie termicheskoi struktury poverkhnostnykh vod u poberezh'ya Primor'ya v osennii period 2000 (Change in the thermal structure of surface waters off the coast of Primorye in the autumn 2000), In: Okeanologicheskie issledovaniya (Oceanological research), Vladivostok: Dal'nauka, 2002, pp. 75–83.
- Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Sinopticheskie vikhri v raione zaliva Petra Velikogo po sputnikovym dannym (Synoptic vortexes in the area of Peter the Great Bay according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 3–15.
- Lazaryuk A. Yu., Dinamicheskaya korrektsiya CTD-dannykh (Dynamic correction of the CTD data), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2009, No. 2 (8), pp. 59–71.
- Lazaryuk A. Yu., Korrektsiya dinamicheskoi pogreshnosti dannykh glubokovodnykh gidrologicheskikh nablyudenii s pomoshch'yu CTD-zondov (CTDdata_cor) (Correction of the dynamic error of CTD data (CTDdata_cor)), Certificate of state registration of the PC computer program No. 2010617298, 2010, November 1.
- Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.Ya., Telli L.D., Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrei severnoi chasti Yaponskogo morya, Dal'nevostochnye morya (Structure and Dynamics of Synoptic Vortices in the Northern Part of the Sea of Japan), In: Okeanologicheskie issledovaniya (Oceanological research), Vol. 1, Moscow: Nauka, 2007, pp. 450–473.
- Nikitin A.A., Yurasov G.I., Sinopticheskie vikhri Yaponskogo morya po sputnikovym dannym (Synoptic vortices of the Sea of Japan according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 2–57.
- Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Soloviev V.A., Tsibulsky A.L., Shvoev D.A. Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station, *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 233–242.
- Ostrovskii A.G., Zayakorennnye mobil'nye profiliruyushchie apparaty (Moored mobile profilers), In: Osvoenie glubin okeana (The development of the depths of the ocean), Moscow: Oruzhie i tekhnologii, 2017 (in print).
- Operator's manual. SBE Data Processing 7.23.2. <http://www.seabird.com>.
SBE 52-MP Moored Profiler CTD & (optional) Dissolved Oxygen Sensor. <http://www.seabird.com>.
- Ponomarev V.I., Faiman P.A., Dubina V.A., Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B., Sinopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym materikovym sklonom i shel'fom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezul'taty distantsionnykh nablyudenii) (Synoptic vortex dynamics over the north-western continental slope and the shelf of the Sea of Japan (modeling and results of remote observations)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 100–104.
- Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.Y., Kim K.-R. Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea, *Deep Sea Res. I.*, 2007, Vol. 54, No. 4, pp. 453–470.
- The acquisition, calibration, and analysis of CTD data, *UNESCO technical papers in marine science*, 1988, Vol. 54, 94 p.
- Yurasov G.I., Vanin N.S., Nikitin A.A. Characteristics of fronts in the Sea of Japan in accordance

А.Ю. Лазарюк и др.

with vessel and satellite measurements, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, No. 4, pp. 256–264.

Yurasov G.I., Yarichin V.G., *Techeniya Yaponskogo moraya* (The currents of the Sea of Japan), Vladivostok: DVO RAN, 1991, 176 p.

Zhadan P.M., Vashchenko M.A., Lobanov V.B., Kotova S.A., *Issledovanie vliyaniya faktorov sredy na nerest morskogo ezha Strongylocentrotus intermedius* (Investigation of the influence of environmental factors on the spawning of a sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*), *Vestnik DVO RAN*, 2013, No. 6, pp. 170–179.

Zvalinskii V.I., Lobanov V.B., Zakharkov S.P., Tishchenko P.Ya. Chlorophyll, delayed fluorescence, and primary production in the northwestern part of the Sea of Japan, *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 1, pp. 23–32.