



МОРСКОЙ АВТОНОМНЫЙ ЗОНД-ПРОФИЛОГРАФ

Л.А. Краснодубец^{1,2}, Ю.Е. Шишкин^{1,2}, О.Ю. Шаповалов²,
А.В. Клименко², М.Н. Пеньков²

¹Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

²Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: lakrasno@gmail.com

Представлено решение задачи оперативного анализа вертикального профиля плотности морской воды океанской толщи на основе использования предложенной модели морского автономного зонда-профилографа и оригинального метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды. Приведены результаты проектирования корпусной части и бортовой системы динамических измерений, а также компьютерного моделирования. Результаты представлены в виде схем моделирования основных функциональных блоков зонда-профилографа и графика распределения плотности морской воды как функции гидростатического давления, а также приведены показатели абсолютной и относительной погрешности вычисления ординат плотности морской воды, которые были рассчитаны в ходе моделирования процесса измерений эталонного вертикального профиля плотности морской воды предложенным методом. На основе полученного профиля плотности морской воды могут быть оперативно получены распределения основных характеристик вертикальной стратификации океанской толщи как функций гидростатического давления.

Ключевые слова: динамические измерения, морской автономный зонд, плотность морской воды, гидростатическое давление, компьютерное моделирование.

Поступила в редакцию: 19.02.2024. После доработки: 15.03.2024. Принята к печати: 22.03.2024

Введение. Современное состояние профильных измерений вертикального распределения термохалинных параметров океанской среды характеризуется массовым характером проводимых станций на регулярной основе и глобальным охватом поверхности Мирового океана. Координаты новых станций постоянно обновляются, пополняя базу данных *TS*-профилей, которые вскоре становятся доступными для заинтересованных пользователей. Это подтверждает успешную реализацию международной программы *Argo* [1], предназначенной для крупномасштабных исследований верхнего слоя океана. В рамках этой программы работает сеть, состоящая из более 3800 подводных роботов – автономных профилографов, построенных на основе ныряющих буев с регулируемой плавучестью класса *Argo*. Вместе с тем, открытие тонкой структуры океанских вод – природного явления, заключающегося в расслоении океана на тонкие слои

и прослойки с размерами по вертикали от 0,01 м до 10 м и по горизонтали от 0,01 м до 10 км [2], определяет новые задачи при исследовании вертикальных профилей и, в частности, задачи обнаружения и измерения мелкомасштабных, как по пространству, так и по времени явлений, связанных с изменениями температуры и солености океанской среды. Для решения этих актуальных задач профилографы *Argo* оказываются недостаточно эффективными. Во-первых, они проводят профилирование с постоянной скоростью $v = 0,1$ м/с в режиме подъема с глубины 2000 м до выхода на поверхность, что требует около 6 часов и является слишком длительным для обнаружения мелкомасштабных явлений. Во-вторых, разрешение отбора данных по глубине составляет 10 м. Этого явно недостаточно для обнаружения тонких слоев воды с отличительными свойствами во время вертикального зондирования.

Таким образом, разработка методов и средств, обеспечивающих оперативное обнаружение и измерение характеристик стратификации океанских вод, является актуальной задачей.

В работе [3] была выполнена оценка характеристик режимов движения ныряющих буев (профилографов) при регистрации вертикальных распределений температуры и солености морской воды с учетом рекомендаций WOCE. В результате были сформулированы требования к допустимой вертикальной скорости подъема ныряющего буя в области большого градиента температуры при использовании датчиков температуры фирмы Sea Bird Electronics Inc. [3] с постоянной времени $\theta_t = 0,065 \text{ с}$. Чтобы динамическая погрешность измерения не превышала значения

$(\Delta t)_{\text{дин}} \leq 0,0008^\circ \text{C}$ в слое максимального градиента температуры, вертикальная скорость перемещения ныряющего буя не должна превышать

$$v_{\text{дон}} \leq (0,12 \dots 0,025) \text{ м/с}.$$

При этом вертикальная скорость перемещения ныряющего буя должна определяться по скорости изменения гидростатического давления, а текущий градиент температуры должен вычисляться по данным, получаемым непосредственно с помощью бортового микроконтроллера.

Для количественной оценки состояния вертикальной стратификации введены следующие характеристики [4]: вертикальная устойчивость E и частота Вайсяля-Брента N , которая соответствует термохалинным колебаниям (глубинным волнам) с периодом T , вызванных вертикальным перемещением водных масс. Слои морской воды с одинаковой плотностью в океане могут иметь различную толщину (от десятков сантиметров до сотен метров) и значительную протяжённость. При этом вертикальная структура океанской среды может оставаться неизменной как на длительное, так и на короткое время [2]. В случае разрушения установившейся вертикаль-

ной структуры океанских вод могут возникнуть крупномасштабные процессы перемещения водных масс, приводящие к катастрофическим последствиям для судоходства и экологии океана. Поэтому регулярные наблюдения за динамикой вертикального перемещения водных масс требуют разработки методов и средств оперативного анализа состояния вертикальной стратификации вод океанской среды. Под оперативным анализом понимается вычисление основных характеристик вертикальной стратификации непосредственно во время профилирования.

Целью исследования является расширение измерительной базы океанологических исследований путём разработки и создания морского автономного зонда-профилографа, обеспечивающего оперативное построение вертикального профиля плотности морской воды *in situ* как основы для получения вертикальных распределений основных характеристик стратификации океанской среды. При этом решались задачи разработки алгоритмического и программного обеспечения для нужд оперативного анализа состояния вертикальной стратификации вод океанской среды, включая автоматическое построение в режиме, близком к реальному времени (в процессе движения автономного морского зонда-профилографа), распределений основных характеристик вертикальной стратификации как функций гидростатического давления.

Данные и методы. Для вычисления характеристик вертикальной стратификации можно воспользоваться известными соотношениями [4]:

$$E = g(dp/dp), N^2 = gE, T = 2\pi/N, (1)$$

где ρ – плотность морской воды; p – гидростатическое давление; g – ускорение свободного падения на широте океанографической станции, значение которого зависит так же от глубины.

Из вышеприведенных соотношений (1) следует, что основной операцией для определения вертикальной устойчивости

E и соответствующей ей частоты Вьяй-сяля-Брента является вычисление градиента плотности морской воды по гидростатическому давлению p . Эту операцию можно выполнить, используя массив данных вертикального распределения плотности морской воды относительно гидростатического давления, построенный в результате проведения и последующей обработки результатов эксперимента в районе океанографической станции, либо в процессе погружения морского зонда-профилографа и экспресс обработки данных измерений в ходе эксперимента при условии измерения плотности морской воды бортовыми средствами *in situ*.

В настоящее время непосредственное измерение плотности морской воды на глубине выполняют редко. Обычно профильные измерения характеристик стратификации вод основаны на построении вертикального распределения термодинамических параметров океанской среды – температуры T и солёности S в зависимости от глубины D , соответствующей гидростатическому давлению p . При этом на практике прямые измерения выполняются только для температуры морской воды и гидростатического давления, а солёность определяется косвенным методом на основе прямых измерений электропроводимости C или скорости распространения звука V в исследуемой среде. Важнейшая гидрологическая характеристика – плотность, которая необходима для вычисления основных характеристик стратификации, вычисляется так же косвенным путём при помощи уравнения состояния морской воды *TEOS-10* по измеренным термодинамическим параметрам в соответствии рекомендациями *WOCE* при помощи *CTD* профилографов поплавкового типа *Argo*, например, *SEACAT SBE 19 plus*, применение которых требует существенных временных затрат на эксперимент (не менее суток для построения только массивов данных измерений *CTD* параметров). Это связано с особенностями режимов профилирования с малыми вертикальными скоростями, обеспечиваю-

щими допустимые динамические искажения в измерениях датчика температуры, имеющего наибольшую постоянную времени по сравнению с другими сенсорами, установленными на борту *CTD* профилографа *Argo*.

Таким образом, построение распределений плотности морской воды и соответствующих характеристик вертикальной стратификации океанской среды методом, рекомендованным *WOCE*, требует значительных временных затрат на проведение эксперимента по вертикальному профилированию и последующую обработку полученных данных.

Существенного сокращения времени получения характеристик вертикальной стратификации можно достичь за счёт увеличения вертикальной скорости погружения автономного морского буя-профилографа и применения метода измерения плотности морской воды непосредственно в процессе профилирования.

Увеличение скорости профилирования можно достичь за счёт исключения из состава информационно-измерительного канала бортовой аппаратуры звена с самой большой постоянной времени – датчика температуры, а также применения метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды, который не требует данных о температуре и основан на использовании зонда-профилографа, оборудованного бортовой системой измерения траекторных параметров его вертикального движения [5].

В основе этого метода лежит математическое описание процесса динамического измерения плотности морской воды ρ и её приращения $\Delta\rho$ как функций глубины z в форме дифференциального уравнения, описывающего вертикальное движение (погружение) в стратифицированной океанской среде корпусной части автономного морского зонда-профилографа с известными формой и размерами. При этом для построения профиля плотности морской воды требуется измерение глубины z , скорости погружения морского зонда \dot{z} и ускорения \ddot{z} с

помощью бортовой инерциальной системы, содержащей в своём составе акселерометр и два интегратора. Уравнение процесса погружения неуправляемого зонда в таком случае имеет вид [5]

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}(t)^2 + fg, \quad t \in [t_0, t_f], \quad (2)$$

$$t_0 = 0; \quad z(t_0) = 0; \quad \dot{z}(t_0) = 0,$$

где $z(t)$ – текущая глубина; g – ускорение свободного падения на широте места положения гидрографической станции;

$a = C_x S / 2V_0^0$ – конструктивный параметр корпусной части зонда; C_x – коэффициент лобового сопротивления корпусной части зонда; S и V_0^0 – максимальная площадь поперечного сечения и объём корпусной части зонда;

$f = \rho^0 / \rho(z)$ – коэффициент, характеризующий влияние плотности морской воды на вертикальную составляющую ускорения зонда; $\rho(z)$ – плотность морской воды, которая представлена как функция глубины

$$\rho(z) = \rho^0 + \Delta\rho(z), \quad (3)$$

где ρ^0 – значение плотности морской воды в поверхностном слое океана (или среднее её значение) на широте φ местоположения зонда; $\Delta\rho(z)$ – приращение плотности морской воды.

Нелинейное дифференциальное уравнение (2) вместе с соответствующими начальными условиями представляет собой математическую модель зонда-профилографа, которая описывает динамику его вертикального движения в поле гравитации Земли в зависимости от глубины $z(t)$ при погружении в стратифицированной океанской среде при задании функции $\rho(z)$, характеризующей распределение плотности морской воды по глубине, а также ускорения свободного падения g , которое, строго говоря, зависит от географической широты ме-

стоположения φ и глубины погружения z зонда-профилографа.

Поставим задачу преобразования «глубинной» модели (2) к виду, удобному для описания динамических процессов вертикального движения зонда в поле гидростатического давления в условиях стратифицированной океанской среды, находящейся в равновесном невозмущённом состоянии. В таком случае решение этой задачи можно выполнить при помощи основного уравнения гидростатики, связывающего гидростатическое давление $p(z)$ на глубине z с вертикальным профилем плотности $\rho(z)$ морской воды и ускорением свободного падения $g(\varphi, z)$, зависящим от широты φ местоположения зонда и глубины его погружения z , которое имеет вид

$$p(z) = p_a + \int_0^z g(\varphi, z)\rho(z)dz, \quad (4)$$

где p_a – атмосферное давление.

Рассмотрим разность двух гидростатических давлений p_1 и p_2 , на соответствующих горизонтах океанской толщи, которые последовательно проходит зонд при вертикальном перемещении с учётом основного уравнения гидростатики (4), а также малой зависимости ускорения $g(\varphi, z)$ от географической широты φ и глубины z . Имеем

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_2 - p_1 = g \int_0^{z_2} \rho(z)dz - g \int_0^{z_1} \rho(z)dz = \\ &= g \int_{z_1}^{z_2} \rho(z)dz = g(z_2 - z_1)\bar{\rho}(z) = g\Delta z\bar{\rho}(z). \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует

$$\Delta p / \Delta z = g\bar{\rho}(z), \quad (6)$$

где Δz – перемещение зонда по глубине от горизонта с давлением p_1 к горизонту с давлением p_2 ; $\bar{\rho}(z)$ – средняя плотность морской воды между двумя изобарическими слоями p_1 и p_2 ; g – ускоре-

ние свободного падения для географической широты местоположения и глубины погружения зонда.

При стремлении Δz к нулю можно перейти от конечных разностей в (6) к полной производной гидростатического давления

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} [\Delta p / \Delta z] = g\bar{\rho}(z). \quad (7)$$

Полагая в (7) $\bar{\rho}(z) = \rho^0$ с учётом (3), имеем

$$dp/dz = g\rho^0. \quad (8)$$

Далее, разделив числитель и знаменатель в (8) на dt , найдём выражения для производных \dot{z} и \ddot{z} глубины z через производные \dot{p} и \ddot{p} гидростатического давления p . Имеем

$$\dot{z} = \dot{p} / g\rho^0, \quad \ddot{z} = \ddot{p} / g\rho^0. \quad (9)$$

Из первого соотношения в (9) следует, что «барическая» скорость \dot{p} больше «метрической» скорости \dot{z} на величину $g\rho^0 = G$.

Выполняя подстановку выражений (9) в уравнение (2) с заменой $g\rho^0 = G$, можно преобразовать «глубинную» модель динамики вертикального движения зонда (2) в соответствующую «барическую» модель, которая получит следующий вид

$$\ddot{p}(t) = -[a/G]\dot{p}(t)^2 + fGg, \quad (10)$$

$$t_0 = 0; p(t_0) = p_0; \dot{p}(t_0) = 0; t \in [t_0, t_f],$$

где $p(t)$ – текущее гидростатическое давление; g – ускорение свободного падения на географической широте φ местоположения зонда на горизонте текущего гидростатического давления $p(t)$; f – коэффициент, характеризующий влияние плотности морской воды на вертикальную составляющую ускорения зонда.

Как следует по аналогии из описания (2)

$$f = \rho^0 / \rho(p), \quad (11)$$

где $\rho(p)$ – профиль плотности морской воды, который, в отличие от (2), определён как функция гидростатического давления, что в современной океанологии применяется при описании профилей плотности морской воды и характеристик её стратификации.

Уравнение (10) вместе с соответствующими начальными условиями описывает процесс вертикального движения зонда как тела цилиндрической формы в поле гидростатического давления в условиях стратифицированной океанской среды с вертикальным профилем плотности морской воды $\rho(p)$.

Перепишем дифференциальное уравнение (10) с учётом соотношения (11), а также ранее выполненной подстановки $g\rho^0 = G$. Имеем

$$\ddot{p}(t) = -\frac{a}{G}\dot{p}(t)^2 + G^2 \frac{1}{\rho(p)}. \quad (12)$$

При этом выражение для приращения плотности морской воды $\Delta\rho$ представим по аналогии с [5] в следующем модифицированном виде

$$\Delta\rho(p) = -\frac{\rho^0}{g}[\ddot{p}(t) + a\dot{p}^2(t) - g], \quad (13)$$

$$t_0 = 0; p(t_0) = p_0; \dot{p}(t_0) = \dot{p}_0, \quad (14)$$

где ρ^0 – начальная плотность морской воды, измеренная на поверхности перед погружением зонда-профилографа (или её среднестатистическое значение); g – ускорение свободного падения на широте станции измерения профиля; a – конструктивный параметр, зависящий от коэффициента лобового сопротивления C_x , площади поперечного сечения S_m

и объёма V_0^0 корпусной части автономного зонда-профилографа.

Знание плотности ρ^0 позволяет с учётом соотношения

$$\Delta\rho(p) = \rho(p) - \rho^0$$

получить из (13) выражение для плотности морской воды как функции гидростатического давления в виде

$$\rho(p) = \rho^0 \left\{ 2 - \frac{1}{g} [\ddot{p}(t) + a\dot{p}^2(t)] \right\}. \quad (15)$$

Таким образом, полученные соотношения (13) и (15) с начальными условиями (14) позволяют определить важнейшую характеристику морской воды – плотность в океанской толще через производные гидростатического давления в ходе вертикального погружения зонда-профилографа. Полученный таким образом профиль плотности морской воды можно рассматривать как результат динамических измерений плотности *in situ*.

Если учесть сжимаемость морской воды, то такая замена в (2) вертикальной координаты $z(t)$ на гидростатическое давление $p(t)$ имеет преимущества и с физической точки зрения [7].

Анализ соотношений (13) и (15) приводит к представлению некой алгоритмической структуры информационно-измерительной системы, имеющей входы и выходы. При этом в качестве входов рассматриваются следующие переменные и константы:

$p(t)$ – гидростатическое давление;

ρ^0 – начальная плотность морской воды;

a – конструктивный параметр зонда, влияющий на скорость его погружения;

$g(\varphi, p)$ – ускорение свободного падения на широте станции, которое зависит также от горизонта гидростатического давления, на котором находится зонд.

В качестве выходов рассматриваются: $\rho(p)$ – плотность морской воды;

$\Delta\rho(p)$ – приращение плотности морской воды.

В соответствии с методом динамических измерений [6] данные непосредственных измерений текущих значений забортного гидростатического давления и его производных передаются в специальную цифровую динамическую модель, построенную на базе конечно-разностных уравнений, соответствующих (13) и (15). При этом первая и вторая производные вычисляются через соответствующие разности. Модель включается с началом профилирования при начальных условиях (14) и работает в режиме, близком реальному времени, в течение всего периода профилирования, формируя на выходе текущие значения плотности $\rho(p)$ и её приращения для морской воды $\Delta\rho(p)$ в зависимости от текущего значения гидростатического давления $p(t)$, которое должно измеряться датчиком гидростатического давления. При этом следует отметить, что получаемые в ходе профилирования значения плотности морской воды и её приращения, а также соответствующие значения гидростатического давления, могут параллельно использоваться для вычисления основных характеристик вертикальной стратификации океанской толщи по формулам (1).

Расчёт конструкции корпусной части зонда-профилографа выполнен с целью обеспечения требуемой скорости погружения при профилировании.

Поскольку практическое использование зонда-профилографа планируется для решения задач оперативной океанологии и, в частности, для исследования текущего состояния вертикальной стратификации океанской толщи без измерения температуры морской воды, была выбрана требуемая вертикальная скорость профилирования на порядок большая, чем это принято для профилографов класса Argo, а именно 1 м/с.

Анализ уравнения (2), описывающего процесс погружения неуправляемого зонда как тела цилиндрической формы, образующая которой нормальна океанской поверхности, показал, что его скорость погружения в однородной водной среде с плотностью ρ определяется зна-

чением параметра a , который можно вычислить по формуле

$$a = \rho \frac{C_x S_m}{2m} = \rho \frac{C_x S_m}{2LS_m \rho} = \frac{C_x}{2L},$$

где ρ – плотность морской воды; $S_m = \pi(d_m/2)^2$ – площадь миделя; d_m – диаметр цилиндра корпуса; $m = LS_m \rho$ – масса корпуса зонда; L – длина корпуса (цилиндра); C_x – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от отношения L/S_m [7].

Некоторые производители морских зондов-профилографов, возвращаемых после миссии на океанскую поверхность, устанавливают на корпусе стабилизирующее кольцо на уровне ватерлинии плавающего зонда в положении, когда образующая корпуса нормальна по отношению к плоскости океанской поверхности. Это кольцо снижает вертикальные колебания зонда, делает его более заметным, а также влияет на скорость вертикального перемещения.

Расчётная формула для определения коэффициента a с учётом установленного стабилизирующего кольца с диаметром d_r принимает вид

$$a = \frac{C_x \pi (d_r/2)^2}{2S_m L}.$$

Схема функциональная бортовой аппаратуры морского автономного зонда представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения:

1 – датчик давления, измеряющий *in situ* текущее значение забортного гидростатического давления;

2 – аналого-цифровой преобразователь датчика давления;

3 – бортовой микроконтроллер с установленным программным обеспечением, включающим программу специальной динамической модели, построенной на основе (13) и (15), которая предназначена для вычисления текущей плотности морской воды и ее приращенения на основе начальных условий и данных инструментальных измерений текущих значений гидростатического да-

вления, соответствующего его глубине погружения зонда-профилографа;

4 – устройство связи для передачи данных;

5 – персональный компьютер, установленный на судне сопровождения или в лаборатории на материковой части земной поверхности;

6 – устройство внешней памяти (накопитель) для хранения массивов данных;

– вертикального распределения плотности морской воды;

– дискретного ряда значений гидростатического давления, при которых вычислялись ординаты плотности морской воды;

7 – переносной пульт ввода данных в бортовой микроконтроллер;

8 – резервный датчик давления;

9 – аналого-цифровой преобразователь;

10 – измерительный канал для установки дополнительного датчика;

11 – аналого-цифровой преобразователь.

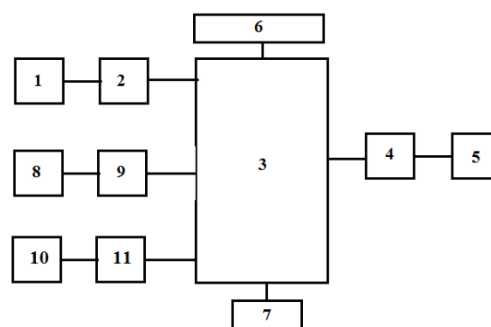


Рис. 1. Схема функциональная бортовой аппаратуры морского автономного зонда

Fig. 1 Functional diagram of the onboard equipment of a marine autonomous probe

Компьютерное моделирование выполнено в среде MATLAB & Simulink.

Структурная схема моделирования (S-модель) выполнена в виде двух подсистем – профилирования и оперативного анализа, которые управляются программой, находящейся в m-файле.

Модель процесса профилирования построена в виде следующих блоков:

– блок моделирования морской стратифицированной среды, включающий эталонную модель профиля плотности

морской воды района Чёрного моря как функции гидростатического давления;

– блок моделирования динамики погружения зонда-профилографа;

– блоки ввода начальных значений плотности морской воды и атмосферного давления;

– блок моделирования процесса накопления и записи в файл массива измерений (временного ряда), выполненных датчиком гидростатического давления, установленным на корпусной части зонда-профилографа.

Модель процесса оперативного анализа динамического состояния океанской среды представлена в виде автономного блока, на вход которого поступают значения гидростатического давления (или считываются из файла, сформированного в блоке моделирования процесса профилирования), а также ускорение свободного падения g в виде константы, значение которой вычисляется в специальной управляющей программе, размещённой в m -файле, по следующей формуле с учётом широты местоположения зонда φ и глубины его погружения z

$$g = 9,780318 * (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000006 \sin^2 \varphi) - 0,00000308 z. \quad (16)$$

В управляющей программе также вводятся исходные данные и начальные значения моделируемых процессов. Начальные данные включают:

$\rho^0 = 1013,2640 \text{ кг/м}^3$ – начальное значение плотности морской воды;

$p^0 = 0,101325 \text{ МПа}$ – атмосферное давление у поверхности океана;

$a = 5,9294 \text{ м}^{-1}$ – конструктивный параметр корпусной части зонда-профилографа, обеспечивающий погружение зонда с вертикальной скоростью примерно 1 м/с в однородной водной среде с плотностью ρ^0 при следующих конструктивных размерах корпусной части морского зонда-профилографа:

$$L = 0,3 \text{ м}; d_m = 0,12 \text{ м}; d_r = 0,2455 \text{ м}; C_x = 0,85.$$

Постоянные времени датчика давления и устройств дифференцирования:

$$T_p = 0,5 \text{ с}; T_{d1} = 0,36 \text{ с}; T_{d2} = 0,55 \text{ с}.$$

В блоке оперативного анализа вычисляются текущие ординаты плотности морской воды и её приращения при соответствующих значениях гидростатического давления и строится график вертикального распределения плотности морской воды как функции гидростатического давления.

В ходе моделирования проводился контроль точности выполняемых вычислений. При этом вычислялась погрешность как модуль разности между ординатами эталонного профиля плотности морской воды, полученного во время эксперимента на гидрографической станции в Чёрном море, и соответствующими ординатами получаемого профиля в результате моделирования. Вычислялась также и относительная погрешность.

S-модель процессов профилирования и оперативного анализа представлена на рис. 2.

Обсуждение результатов компьютерного моделирования, выполненного в два этапа. На первом этапе с помощью управляющей программы, размещённой в m -файле, вычислялись исходные данные для моделирования в среде визуального моделирования Simulink системы MATLAB.

На втором этапе с помощью S-модели, изображённой на рис. 2, моделировался процесс вертикального профилирования с помощью автономного морского зонда-профилографа на временном отрезке [0, 500] с. При этом был достигнут горизонт гидростатического давления 502,4 дбар ($5,024 \times 10^6$ Па) на глубине 502,7 м, что соответствует показаниям цифровых дисплеев «Current pressure» и «Current depth».

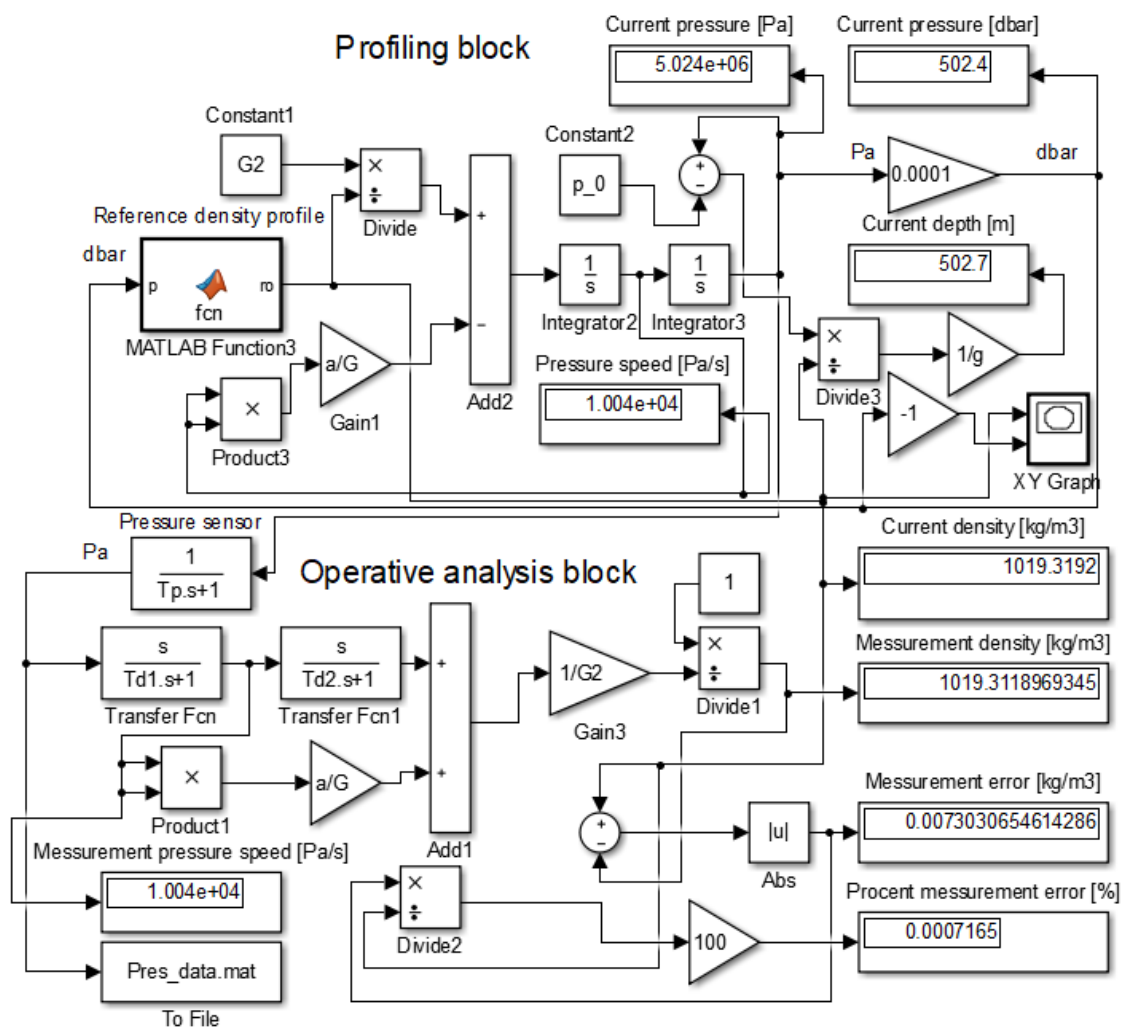


Рис. 2. S-модель процессов вертикального профилирования и оперативного анализа
 Fig. 2. S-model of vertical profiling and operational analysis processes

В ходе моделирования процесса профилирования при погружении зонда-профилографа выполнялась регистрация данных, поступающих от датчика давления «Pressure sensor», установленного на корпусной части, которые по мере поступления передавались в подсистему оперативного анализа, где практически в реальном времени вычислялись и отображались на соответствующих цифровых дисплеях текущие значения плотности морской воды и соответствующей глубины погружения. При этом так же формировались массивы (временные ряды) для ординат текущего гидростатического давления и плотности морской во-

ды, которые накапливались и сохранялись в устройстве энергонезависимой памяти. На практике сформированные массивы могут быть переданы потребителю после всплытия зонда каким-либо способом и использованы, например, для построения графиков соответствующих распределений.

На рис. 3 представлены результаты работы подсистемы оперативного анализа в виде графика профиля плотности морской воды. При необходимости на основе этих результатов путём доработки программного обеспечения возможно построение распределений (1) характеристик вертикальной стратификации.

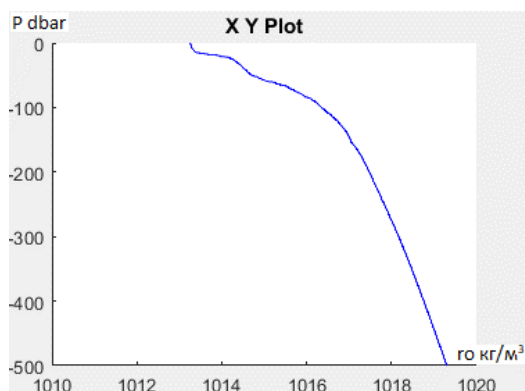


Рис. 3. Профиль плотности морской воды
Fig. 3. Seawater density profile

Абсолютная и относительная погрешности для искомого вертикального профиля плотности морской воды вычислялись в процессе моделирования и отображались в цифровой форме в окнах дисплеев «Measurement error» и «Procent measurement error», показанных на графической форме S-модели, изображённой на рис. 2. При этом относительная погрешность не превышала 0,005%.

Заключение. Результаты выполненных исследований и разработок позволяют вынести суждение о том, что применение автономного морского зонда-профилографа на практике для оперативных исследований океанской среды позволит за время одного сеанса профилирования в режиме, близком реальному времени, строить числовые массивы вертикальных распределений плотности морской воды как функций гидростатического давления. Это расширит измерительную базу оперативной океанологии в области исследований динамических свойств океанской толщи.

MARINE AUTONOMOUS PROFILER PROBE

L.A. Krasnodubets^{1,2}, Y.E. Shishkin^{1,2}, O.Y. Shapovalov², A.V. Klimenko², M.N. Penkov²

¹Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The paper presents a solution for rapid analysis of marine water density vertical profiles in the oceanic column using a proposed autonomous marine profiler probe model and an innovative method of dynamic measurement of marine water density vertical profiles. The design of the probe's hull and onboard dynamic measurement system are detailed, along with computer simulation results. These include diagrams of the main functional blocks of the profiler probe and a graph showing the distribution of marine water density as a function of hydrostatic pressure. The paper also presents indicators of absolute and relative error

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС "Совершенствование технических средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" (№ госрегистрации 124012700512-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.aoml.noaa.gov/argo/> (дата обращения 03.03.2024).
2. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с.
3. Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями профиломерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.
4. Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства морской воды: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Изд-во Юрайт. 2020. 216 с.
5. Краснодубец Л.А. Метод определения вертикального профиля плотности морской воды на основе измерений параметров движения неуправляемого автономного зонда // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 10. С. 8–15.
6. Мамаев О.И. Морская турбулентность. М.: Изд-во МГУ, 1970. 204 с.
7. Hütte: Справочник для инженеров, техников и студентов. Т. 1 / Пер с немецкого ред. В.К. Запорожец. М.-Л.: Главная редакция литературы по машиностроению. 1936. 914 с.

in the determination of marine water density ordinates calculated during simulations of standard vertical profile measurements with the proposed method. The obtained marine water density profile enables prompt assessments of the main characteristics of the oceanic column's vertical stratification as functions of hydrostatic pressure.

Keywords: dynamic measurements, marine autonomous probe, sea water density, hydrostatic pressure, computer modeling.

REFERENCES

1. <https://www.aoml.noaa.gov/argo/> (March 3, 2024).
2. *Fedorov K.N.* Tonkaya termokhalinnaya struktura vod okeana (Fine thermohaline structure of ocean waters). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 184 p.
3. *Krasnodubets L.A., Zaburdayev V.I., and Al'chakov V.V.* Upravleniye morskimi buyami profilemerami kak metod povysheniya reprezentativnosti termokhalinnykh izmereniy. Modeli dvizheniya (Control of sea buoys with profile measures as a method of increasing the representativeness of thermohaline measurements. Movement patterns). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, No. 4, pp. 69–79.
4. *Arhipkin V.S. and Dobrolyubov S.A.* Okeanologiya. Fizicheskiye svoystva morskoy vo-dy: ucheb. posobiye dlya vuzov. 2-ye izd. (Oceanology. Physical properties of sea water). Moscow: Izd-vo Yurayt, 2020, 216 p.
5. *Krasnodubets L.A.* Metod opredeleniya vertikal'nogo profilya plotnosti morskoy vody na osnove izmereniy parametrov dvizheniya neupravlyayemogo avtonomnogo zonda (Method for determining the vertical density profile of sea water based on measurements of the motion parameters of an uncontrolled autonomous probe). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2017, No. 10, pp. 8–15.
6. *Mamayev O.I.* Morskaya turbulentnost' (Marine turbulence). Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 204 p.
7. *Hütte:* Spravochnik dlya inzhenerov, tekhnologov i studentov. T. 1. (Handbook for engineers, technicians, and students. Vol. 1). Translated from German; edited by V.K. Zaporozhets. Moscow–Leningrad: Chief Directorate of Literature on Machine Building, 1936, 914 p.